



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAURA JUNTILA

LUJITEMUOVIRAKENTEINEN MELUAITA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja materiaalitek-
niikan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 3. lokakuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

JUNTILA, LAURA: Lujitemuovirakenteinen meluaita

Diplomityö, 69 sivua, 8 liitesivua

Huhtikuu 2013

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen

Avainsanat: Meluaita, äänen absorptio, lujitemuovijäte, impedanssiputki

Diplomityön tavoitteena on selvittää, voiko muissa prosesseissa syntyvää lujitemuovijätettä hyödyntää ääntä absorboivan meluaidan sisämateriaalina. Lisäksi selvitetään, mitä muita vaatimuksia meluaidalle on asetettu ja voidaanko nämä vaatimukset toteuttaa käyttämällä lujitemuovia.

Meluaitoja on kahdenlaisia, ääntä heijastavia ja absorboivia. Riippumatta siitä, millainen meluaidan toimintaperiaate on, sillä on oltava riittävät lujuusominaisuudet esimerkiksi tuuli- ja lumikuorman, kivien iskujen ja aidan oman painon kestämiseksi. Muita vaatimuksia ovat esimerkiksi riittävä tulenkestävyys, aitaan sijoitettavat hätäuloskäynnit, ympäristönäkökohdat, valon heijastuminen sekä huollon ja korjausten helppous. Äänen eristävyys tulisi olla vähintään 20 – 25 dB sekä ääntä absorboivilla aidoilla absorptiokyvyn vähintään 8 dB, jotta aita voi markkinoida ääntä absorboivana.

Yleisimmät meluaidoissa käytetyt materiaalit ovat puu, betoni ja kivi. Ääntä absorboivat aidat ovat usein kasettirakenteisia, joissa metallista valmistetun kasettirakenteen tien puoleinen sivu on rei'itetty ja kasetin sisällä on ääntä absorboivaa materiaalia.

Ääntä absorboivat materiaalit voidaan luokitella kuitumaisiin, solukkoisiin ja rakeisiin. Parametrit, jotka parantavat materiaalin absorptiokykyä, ovat suurempi ilman virtausvastus (aina virtausvastuksen arvoon 1000 asti), suurempi huokoisuuden arvo, mutkitteleva rakenne, pienempi kuitupaksuus ja pienempi raekoko. Tiheämpi rakenne on parempi korkeilla taajuuksilla, hieman avoimempi rakenne matalilla taajuuksilla. Näytepaksuus vaikuttaa etenkin matalilla taajuuksilla, sillä paksumpi materiaali absorboi ääntä paremmin.

Tässä työssä valmistettiin 11 erilaista näytettä perustuen yllä mainittuihin parametreihin. Osa näytteistä valmistettiin murskatusta ja rouhitusta lujitemuovilevystä (rakeinen materiaali) ja osa kuitujätteestä (kuitumainen rakenne). Näiden näytteiden absorptiokyky mitattiin käyttämällä impedanssiputkea. Tulosten ja näytteiden valmistusprosessin pohjalta valmistettiin vielä kolme uutta näytettä. Näissä lujitemuovimurske oli hieman pienempää ja kokoamisvaiheessa käytettiin vähemmän hartsia, jotta partikkelien repaleiset reunat jäivät hyvin esille. Yhteen näytteistä lisättiin rakeiden sekaan myös lasikuituja. Materiaalien absorptiokyky mitattiin impedanssiputkella.

Tulosten perusteella todettiin, että lujitemuovimursketta ei ole järkevää käyttää meluaidan ääntä absorboivana sisämateriaalina, sillä vertailumateriaalina käytetty polyuretaanivaahdo oli selkeästi paremmin ääntä absorboivaa. Murskemateriaali voi kuitenkin olla potentiaalinen tutkimusaihe äänen absorption osalta, jos rouhetta on mahdollista valmistaa kustannustehokkaasti pienemmäksi. Muuten komposiittien käyttö meluaidoissa on mahdollista, kunhan lujuus- ja muut ominaisuudet ovat riittävät. Lujitemuovin avulla voidaan saavuttaa myös parempi korroosion- ja kosteudenkesto kuin perinteisillä materiaaleilla, jolloin käyttöikä nousee. Komposiitit ovat kevyitä, joten kuljetus- ja pystytyskustannukset alenevat ja aidan pystytys on helpompaa. Lisäksi lujitemuovi antaa uusia mahdollisuuksia meluaidan muotoiluun ja ulkonäön suunnitteluun.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Science

JUNTILA, LAURA: Noise barrier constructed using fiber reinforced plastics

Master of Science Thesis, 69 pages, 8 Appendix pages

April 2013

Major: Plastic and elastomer technology

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen

Keywords: Noise barrier, sound absorption, fiber reinforced plastic waste, impedance tube

The objective of this thesis is to find out if it is possible to use recycled composite as an inner material in a sound absorbing noise barrier. It is also examined if composites can be used otherwise in noise barriers.

There are two types of noise barriers: sound reflective and sound absorbing. Regardless of the barrier type, it should meet certain requirements. Barrier should have sufficient strength properties under different loads (for example wind and snow load, stone impacts and self weight). Other requirements are e.g. resistance to brush fire, environmental aspects, emergency escapes, reflection of light, maintenance and design. Sound insulation should be at least 20 – 25 dB and sound absorption for absorbing barrier at least 8 dB.

Materials generally used in reflective noise barriers are wood, concrete, metal and rock. Sound absorbing barriers are generally cassettes made of metal, whose one side is perforated and inside of the cassette is sound absorbing material.

Three main types of porous sound absorbing materials exist: fibrous, cellular and granular. Parameters that improves absorption coefficient of the material are higher air flow resistance (until resistance value 1000), higher value of porosity, tortuous structure, smaller fiber diameter and smaller grain size. Dense structure is better for medium and high frequencies, less dense structure for lower frequencies. Sample thickness affects especially at lower frequencies, thicker sample increases absorption coefficient.

In this work, 11 different kinds of samples were made based on the parameters above. Others were made of grinded and crushed composite sheet (granular material) and others from the fiber “left overs” (semi-fibrous material). Sound absorption coefficients of the samples were measured with an impedance tube. Based on the results and manufacturing of the samples, three additional samples were made. In these materials particle size were a little bit smaller and less resin was used, so that the ragged edges of the grains were exposed. In one of the samples also glass fibers were added. Sound absorption coefficients of the samples were measured again with the impedance tube.

The results demonstrated that it is not reasonable to use material made of grinded and crushed composite as an inner material of sound absorbing noise barrier, because commercially available polyurethane foam (which was used as a comparison material) was clearly more sound absorbing. However, the use of crushed composite as sound absorbing material could be interesting research subject, if the grinding of the composite sheet into even smaller grain size could be done cost efficiently. Otherwise composites can be used in noise barriers, if strength and other requirements are reached. They provide better corrosion and humidity resistance than metals and wood, leading to longer service life. They are also lighter providing easier installation and lower costs in transportation and building up a barrier. Composites also give new possibilities for design.

ALKUSANAT

Good fences make good neighbors. Niinhän se on, etenkin jos lähinaapurina sattuu olemaan vilkasliikenteinen ja paljon melua tuottava moottoritie. Kiitänkin Ekin Muovia mielenkiintoisesta aiheesta, ei ole ennen tullut niinkään kiinnitettyä huomiota teiden meluaitoihin, tästä lähtien todennäköisesti niitä katselee aina arvioivasti. Kiitoksia satelee myös professori Jyrki Vuoriselle, joka ohjasi työtäni ystävällisesti ja leppoisasti, mutta silti asiantuntevasti ja tiukasti. Oma huomionsa kuuluu Reija Suihkoselle, jonka asettamat dead linet varmistivat työn edistymisen.

Työn sujumista edisti myös Muovi ja elastomeeritekniikan laboratorion tarjoamat työskentelytilat sekä lainatietokone, oma tietokoneeni kun sanoi sopimuksen irti jo diplomityön alkuvaiheilla. Konstruktiotekniikan laitos puolestaan antoi käyttööni mittauslaitteiston, jonka avulla näytteet tutkittiin.

Perheelle ja ystäville kuuluu kiitokset tuesta ja kannustuksesta, etenkin niinä hetkinä, kun motivaatiokäyrä alkoi viettää alaspäin. Sieltä päästiin kuitenkin aina ylös ja ihan huipulle asti, sillä tässä tämä nyt on, valmis diplomityö!

18.3.2013

Laura Junttila

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto.....	1
2 Meluaita.....	2
2.1 Meluntorjunta.....	2
2.2 Meluaidan toimintaperiaate	6
2.2.1 Heijastava meluaita	6
2.2.2 Ääntä absorboiva meluaita	7
2.2.3 Diffraktiota ja äänen heijastumista vähentävä meluaita.....	7
2.3 Vaatimukset	12
2.3.1 Akustiset ominaisuudet	12
2.3.2 Lujuusvaatimukset	14
2.3.3 Muut vaatimukset	16
2.3.4 Vaatimukset meluaidan perustuksille	18
2.4 Meluaidan kustannukset	19
3 Aidan materiaalit.....	20
3.1 Puu.....	20
3.2 Betoni.....	21
3.3 Metalli.....	22
3.4 Kivi	22
3.5 Maavalli sekä puut ja istutukset	23
4 Komposiitti meluaidan materiaalina	24
4.1 Edut perinteisiin meluaitoihin verrattuna	24
4.2 Yleiset absorboivat materiaalit.....	26
4.3 Äänen absorptioon vaikuttavat ominaisuudet materiaalissa	28
4.3.1 Ilman virtausvastus (airflow resistance).....	29
4.3.2 Huokoisuus	29
4.3.3 Kuitupaksuus (villat).....	31
4.3.4 Tiheys	33
4.3.5 Paksuus.....	33
4.3.6 Mutkittelevuus (tortuosity).....	34
4.3.7 Raekoko (rakeinen materiaali).....	34
4.4 Olemassa olevat ääntä absorboivat meluaidat sekä komposiittiaidat.....	36
5 Meluaidan akustiset mittausten menetelmät ja simuloinnit	41
5.1 Meluaitastandardit	41
5.1.1 Äänen absorptio, SFS-EN 1793-1	41
5.1.2 Ilmäänen eristävyys, SFS-EN 1793-2	42
5.2 Laskentamallit	42
6 Absorptiosuhteen määrittäminen kokeellisesti	43
6.1 Standarditestausmenetelmän esittely	43

6.1.1	SFS-EN ISO 10534-1.....	44
6.1.2	SFS-EN ISO 10534-2.....	46
6.2	Työssä käytettävä testilaitteisto.....	46
6.3	Putken kalibrointi	48
7	Absorboivan aidan materiaalin valmistus	51
8	Testaus ja tulokset.....	55
9	Täydentävät mittaukset.....	60
10	Lujitemuovirakenteisen meluaidan tulevaisuudennäkymät	67
11	Yhteenveto.....	69
	Lähteet.....	70
	Liitteet	76

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

A-painotettu keskiäänitaso	Keskiäänitaso, jossa on huomioitu ihmiskorvan ominaisuudet taajuustasossa
Absorptio	Äänen / lämmön / kosteuden imeytyminen materiaaliin
Adhesiivi	Sidosaine
Allard-Champoux teoria	Eräs laskentamalli materiaalin absorptiokyvyn määrittämiseksi
Diffraktio	Ääniaallon taipuminen
Diffuusi	Hajanainen
Harts	Esipolymeeriseos, joka kovettuu kiinteäksi materiaaliksi
Interferenssi	Kahden tai useamman aaltoliikkeen yhteisvaikutus
Non-woven	Kuitumateriaali, jossa kuituja ei ole kudottu, vaan ne on yhteenliitetty esim. kemiallisesti tai lämpökäsittelyn avulla
PU	Polyuretaani
Resonanssi	Aaltoliikkeen kerrannaisvärähtely

1 JOHDANTO

Epämieluisan ja mahdollisesti jopa haitallisen melun määrä on lisääntynyt ja siitä on tullut vakavasti otettava ongelma. Samaan aikaan myös toiveet ja vaatimukset paremmalle elinympäristölle ovat kohonneet. Tämän vuoksi ohuet, kevyet ja edulliset materiaalit, jotka absorboivat ääntä laajalla taajuusalueella ovat haluttuja. [1] Kun tähän lisätään vielä toive materiaalien kierrätyksestä ja jätteen vähentämisestä, ollaan tämän diplomityön aiheen juurilla.

Liikenteestä aiheutuva melu on kasvava ongelma ja melusteiden kysyntä nousussa. Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää, voiko muissa prosesseissa syntyvää lujitemuovijätettä hyödyntää ääntä absorboivan meluidan sisämateriaalina. Lisäksi selvitetään, mitä muita vaatimuksia meluidalle on asetettu ja voidaanko nämä vaatimukset toteuttaa käyttämällä lujitemuovia.

Ensin perehdytään meluntorjuntaan ja ääntä heijastavan ja ääntä absorboivan meluidan toimintaperiaatteeseen sekä tutustutaan meluidan akustisiin ja muihin vaatimuksiin. Tämän jälkeen esitellään yleisimmät Suomessa meluaidoissa käytettävät materiaalit. Luvun neljä alussa pohditaan ja verrataan, voidaanko lujitemuovia käyttämällä toteuttaa edellä mainitut vaatimukset sekä missä suhteissa lujitemuovi voisi olla perinteisiä materiaaliveikkeitä parempi. Tämän jälkeen tutustutaan erilaisiin ääntä absorboiviin materiaaleihin sekä siihen, mitkä ominaisuudet vaikuttavat materiaalin absorptio-ominaisuuksiin. Luvun lopuksi esitellään olemassa olevia ääntä absorboivia meluita sekä komposiiteista valmistettuja aitoja.

Kokonaisten meluaitaelementtien akustiset ominaisuudet mitataan kaiutahuoneessa. Tähän liittyvät standardit on esitelty luvussa viisi. Uusien materiaalien akustisten ominaisuuksien tutkimiseen soveltuu parhaiten impedanssiputki, johon liittyvät standardit ja toimintaperiaate on kuvattu luvussa kuusi. Samassa luvussa esitellään myös laitteisto, jolla suoritetaan mittaukset. Tämän jälkeen kerrotaan, millaisia näytteitä prosessijätteestä on valmistettu sekä esitetään mittauksista saadut tulokset. Näiden perusteella valmistetaan ja tutkitaan vielä muutama uusi näyte, joista kerrotaan luvussa yhdeksän. Viimeiseksi pohditaan, mitä tuloksista on pääteltävissä sekä mitä toimenpiteitä tai jatkotutkimuksia on hyvä suorittaa.

2 MELUAITA

Melu on etenkin suurkaupungeissa koko ajan kasvava ongelma. Yleisin melun aiheuttaja on maantie- ja rautatieliikenne. Melua synnyttävät myös teollisuus ja rakentaminen, ampuma- ja moottoriurheiluradat sekä ulkoilmatapahtumat. Jatkuvan ja haitallisen melun lähteenä on kuitenkin useimmiten tie- ja raideliikenne. Uusia liikenneväyliä rakennetaan ja vanhoja parannetaan ja laajennetaan, jolloin liikenteen määrä kasvaa asuinalueiden läheisyydessä. Melusteiden kysyntää nostaa liikenneväylien rakentaminen asuin-kortteleiden lähelle ja päinvastoin. Tällöin eivät meluntorjuntaan enää riitä puut ja istutukset, jotka vaativat suuremman alueen melun vaimentamiseen, vaan melun estämiseen on käytettävä meluaitoja. [2, 3, 4]

2.1 Meluntorjunta

Melu ja melulle altistuminen luokitellaan haitalliseksi ympäristövaikutukseksi ja tämän vuoksi sille on oma kohtansa ympäristönsuojelulaissa. Ympäristölain pykälässä 25 määrittellään ennaltaehkäisevänä toimenpiteenä meluselvitys ja meluntorjunnan toimintasuunnitelma sekä ohjeet niiden laadinnalle. Meluselvitys ja meluntorjunnan toimintasuunnitelma on laadittava muun muassa yli 100000 asukkaan väestökeskittymistä, joita asukastiheytensä vuoksi voidaan pitää kaupunkimaisina alueina; yleisistä teistä, joiden liikennemäärä vuodessa on yli kolme miljoonaa ajoneuvoa; rautateistä, joiden liikennemäärä vuodessa on yli 30000 junaa sekä eräistä siviili-ilmailuun käytettävistä lentoasemista [5]. Liikennevirasto on velvollinen laatimaan meluselvityksen ja meluntorjunnan toimintasuunnitelman maanteiden ja rautateiden osalta. Vanhojen teiden ollessa kyseessä melulle herkätkohteet kartoitetaan yhdessä kuntien kanssa ja kohteet asetetaan kii-reellisyys- ja tehokkuusjärjestykseen. Lentoasemien pitäjä laatii ne lentoasemien osalta. Muista liikennealueista selvityksen ja toimintasuunnitelman laatii liikennealueen pitäjä ja väestökeskittymistä muiden kuin edellä mainittujen kohteiden osalta asianomainen kunta. Meluselvityksessä kuvataan yleisesti alueen nykyinen ja tuleva melutilanne, hiljaiset alueet mukaan lukien, käyttäen apuna melun tunnuslukuja. Selvityksessä esitetään myös melulle altistuvien henkilöiden määrä ja alueella olevien asuinrakennusten määrä. Tieliikenteen aiheuttamaa melua arvioidaan yleensä laskentamallien avulla. Suunnittelussa käytetään yleensä ennustetilanteita, sillä melutilanteen arvioiminen mittaamalla ei aina ole mahdollista. [5, 6]

Meluntorjunnan toimintasuunnitelman avulla pyritään torjumaan melua ja sen aiheuttamia vaikutuksia sekä ehkäisemään melun lisääntymistä hiljaisilla alueilla. Meluselvitys ja toimintasuunnitelma on tarkistettava viiden vuoden välein laatimisesta. Tällöin toimintasuunnitelma sekä tarvittaessa myös meluselvitys on uusittava. Toimin-

tasuunnitelmaa on myös muutettava ja täydennettävä muulloinkin, mikäli alueella ilmenee jokin melutilanteeseen oleellisesti vaikuttava tekijä. Toimintasuunnitelmaa laatiessa henkilöiden, joiden asumiseen, työntekoon tai muihin oloihin suunnitelma mahdollisesti vaikuttaa, on saatava esittää mielipiteensä suunnitelmasta. [5, 6]

Valtioneuvoston asetuksessa on säädetty meluselvityksissä käytettävät tunnusluvut ja seikat, jotka on käytävä ilmi meluselvityksestä ja meluntorjunnan toimintasuunnitelmasta. Asetuksessa määrätään myös aikatauluja selvityksen ja toimintasuunnitelman tekemiselle. Meluselvityksissä melun yleistä häiritsevyyttä kuvaavana tunnuslukuna käytetään päivä-ilta-yömelutasoa L_{den} , joka desibeleinä (dB) ilmaistuna määritellään yhtälöllä (1):

$$L_{den} = 10 \times \lg \frac{1}{24} \left[12 \times 10^{\frac{L_{päivä}}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_{ilta}+5}{10}} + 9 \times 10^{\frac{L_{yö}+10}{10}} \right] \quad (1)$$

Kaavassa päivä-, ilta- ja yöajan melun häiritsevyyttä kuvaavat $L_{päivä}$, L_{ilta} ja $L_{yö}$ ovat standardissa ISO 1996-2:1987 tarkoitetut A-painotetut keskiäänitasot, jotka määritellään vuoden kaikkien päivä-, ilta- tai yöaikojen ja sään kannalta keskimääräisen vuoden perusteella. Päiväajan pituus on 12 tuntia kello 07.00 - 19.00, ilta-ajan pituus kolme tuntia kello 19.00 - 22.00 ja yöajan pituus yhdeksän tuntia kello 22.00 - 07.00. [7] A-painotuksella huomioidaan ihmiskorvan ominaisuudet taajuustasossa. A-suodatin vaimentaa korkeita ja matalia ääniä, sillä korvan herkkyys on parhaimmillaan 3 kHz – 4 kHz taajuuksilla ja vähenee lähestyttäessä korkeita tai matalia taajuuksia. [8]

Valtioneuvoston päätöksessä on ohjeena, että asumiseen käytettävillä alueilla, taajamissa tai niiden välittömässä läheisyydessä sijaitsevilla virkistysalueilla sekä hoito- tai oppilaitoksia palvelevilla alueilla melutaso ei saa ylittää ulkona melun A-painotetun ekvivalenttitason (L_{Aeq}) päiväohjearvoa 55 dB eikä yöohjearvoa 50 dB. Uusilla alueilla yöohjearvo on 45 dB. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei tarvitse soveltaa yöohjearvoa. Loma-asumiseen käytettävillä alueilla, leirintäalueilla, taajamien ulkopuolella sijaitsevilla virkistysalueilla sekä luonnonsuojelualueilla on ohjeena, että melutaso ei saa ylittää päiväohjearvoa 45 dB eikä yöohjearvoa 40 dB. [9] Jo muutaman sadan auton vuorokausiliikenne nostaa melutason yli 55 desibeliin. Usein kaupunkien keskustoissa ja pääkaduilla sekä valtateillä melu kohoaa 65 desibeliin. [10]

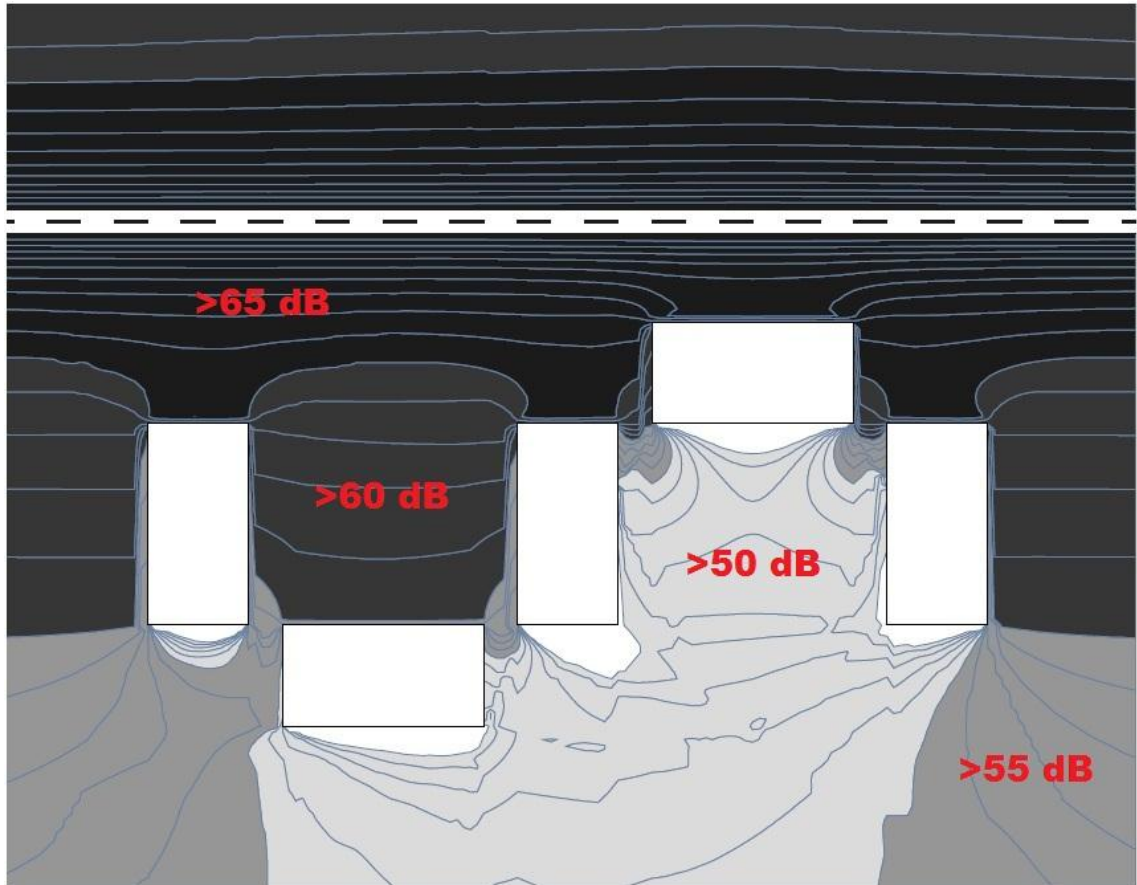
Ensisijainen toimenpide meluntorjunnassa on melun huomioon ottaminen jo kaavoitusvaiheessa sekä melulähteiden vaimentaminen mahdollisuuksien mukaan. Mikäli nämä ennaltaehkäisevät toimenpiteet eivät ole mahdollisia, voidaan meluhaittaa vähentää myös rakennussuunnittelun avulla. [3]

Ennaltaehkäisevässä meluntorjunnassa tärkein asema on ylemmillä kaavoitus-tasoilla, maakunta- ja yleiskaavalla. Kaavoitusta laadittaessa pyritään erottamaan toisistaan melua tuottavat ja hiljaisuutta edellyttävät alueet. Alueiden kaavoitusvaiheessa jäsennellään katuverkosto, pääväylien sijainti sekä joukkoliikenteen periaatteet. Näin ol-len suunnitteluvaiheessa pyritään melua torjumaan sijoittamalla isot maantiet ja läpikul-

kuliikenne kauas melulle herkistä kohteista. Asuntoalueella voidaan meluntorjuntaan käyttää esimerkiksi sijoittamalla alueen kokoojakaduille mutkia, liikenneympyröitä sekä hidastetöyssyjä. Jotta meluntorjunta olisi mahdollisimman tehokasta, on maankäyttöä ja liikennettä suunniteltava yhteistyössä. [3, 11]

Taajama-alueilla liikennemelua aiheuttavat pääasiassa autojen moottorin ja pakoputken äänet. Ajoneuvojen melupäästöihin on kiinnitetty huomiota, ja nykyiset ajoneuvot ovatkin melko hiljaisia verrattuna edeltäjiinsä [12]. Taajama-alueen ulkopuolella, eli suuremmilla nopeuksilla, ensisijaiseksi melunlähteeksi tulevat ajotien päällyste, ajoneuvon renkaat sekä korista aiheutuva ilmanvastus. Ajotien päällysteestä johtuvaa melua voidaan vähentää käyttämällä normaalissa päällysteessä pienempää maksimirakokoa. Rengasvalmistajat kehittävät jatkuvasti hiljaisempia renkaita. Toisaalta renkaiden ja päällysteen aiheuttama melu riippuu paljon toisistaan, joten käytännössä saavutetut vaimennuksen tulokset eivät ole niin hyviä kuin yksittäisten testien tulokset. Hyvän päällysteen melua vaimentava ominaisuus katoaa 1-3 vuoden aikana, tämän vuoksi melua vaimentaviin päällysteisiin on valittava normaalia paremmin kulutusta kestävä materiaalit. Melua voidaan vähentää myös ajonopeuksia alentamalla tai vähentämällä liikennemäärää. Esimerkiksi alentamalla ajonopeutta 20 km/h, äänen intensiteettitaso pienenee noin 3 dB [13]. Samoin liikennemäärän puolittaminen vähentää melua 3 dB. Samalla myös liikenneturvallisuus paranee. [3, 6, 10]

Asemakaavoitusvaiheessa toimenpiteet meluntorjuntaan ovat rajallisemmat. Ennaltaehkäisevänä meluntorjuntakeinona on lähinnä toimintojen ja rakennusten sijoittelu niin, että vähiten meluntorjuntaa kaipaavat toiminnot sijoitetaan suojaamaan melulle herkkiä kohteita, kuten kuvassa 1. [11]



Kuva 1. Rakennusten sijoittelu meluntorjunnan tehostamiseksi. Esimerkiksi sijoittamalla toimistorakennuksia tai autotalleja lähimmäs tietä, saavutetaan asuinalueilla riittävän alhaiset melutasot. Oikeanpuoleisella pihalla päivän keskiäänitaso on 50 – 55 dB, kun puolestaan suojaamattomalla, vasemmanpuoleisella pihalla päivän keskiäänitaso on 60 – 65 dB. [11]

Esimerkiksi sijoittamalla toimistorakennuksia ja autotalleja yllä olevan kuvan mukaisesti tien viereen melusuojaksi, saavutetaan näiden rakennusten takana riittävän alhaiset melutasot asumiselle. Kuvassa olevan tien keskimääräinen arkivuorokausiliikenne on 6000 ajoneuvoa ja tien nopeusrajoitus 60 km/h. Tietä lähimmän rakennuksen etäisyys tien keskilinjasta on 15 m. Melukartan tummimmalla alueella päivän keskiäänitaso on yli 65 dB, toiseksi tummimmalla yli 60 dB, kolmanneksi tummimmalla yli 55 dB ja neljänneksi tummimmalla yli 50 dB. Vasemmanpuoleisen pihan keskiäänitaso on siis päivisin 60 - 65 dB, kun oikeanpuoleisella pihalla melun keskiäänitaso on lähes koko pihan alueella alle 50 - 55 dB. [11] Kuuloaistimuksena pudotus 60 desibelistä 50 desibeliin tarkoittaa metelin puolittumista. [8]

Rakennussuunnittelun avulla voidaan vähentää meluhaittoja esimerkiksi sijoittamalla asuinrakennuksen porraskäytävät, kodinhoitohuoneet, keittiöt sekä pesutilat melulähteen puolelle. Näin rakennuksen hiljaisemmalle puolelle voidaan sijoittaa melulle herkemmit tilat, makuuhuone ja olohuone. Myös rakennuksen kokonaisvaltaisen ääneneristyksen on oltava riittävä. [11]

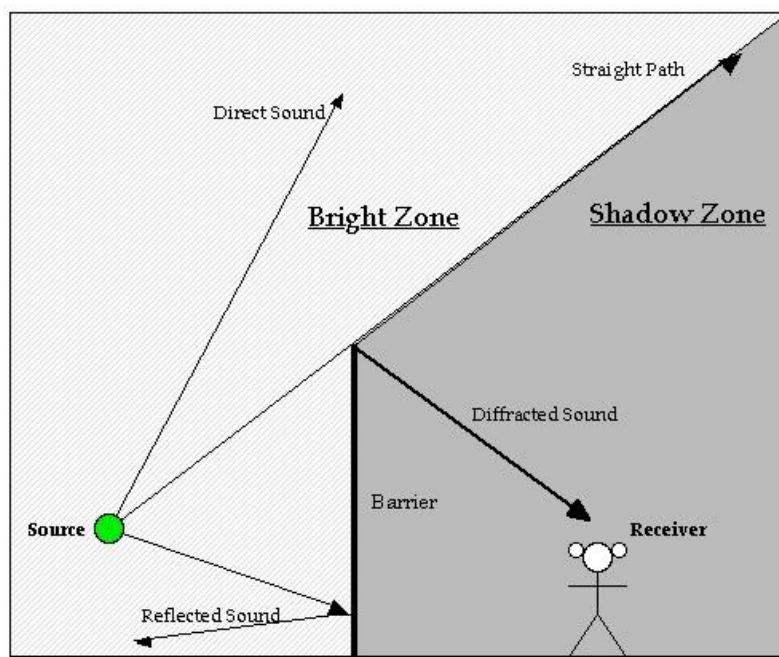
Mikäli edellä mainitut meluntorjunnan keinot eivät ole käytettävissä tai ne eivät ole riittävät, on syytä harkita meluesteiden rakentamista. Ennen meluaidan pystytystä on otettava huomioon monia erilaisia seikkoja, esimerkiksi lait ja säädökset meluesteiden suunnittelusta ja rakentamisesta sekä vaatimukset meluaidan akustisista ja muista ominaisuuksista.

2.2 Meluaidan toimintaperiaate

Meluaita voi toimia kahdella eri tavalla, ääntä heijastavana tai ääntä absorboivana. Molemmat ovat tehokkaita tapoja meluntorjuntaan, mutta molemmissa esiintyy diffraktion, eli äänen taipumisen, aiheuttamia ongelmia.

2.2.1 Heijastava meluaita

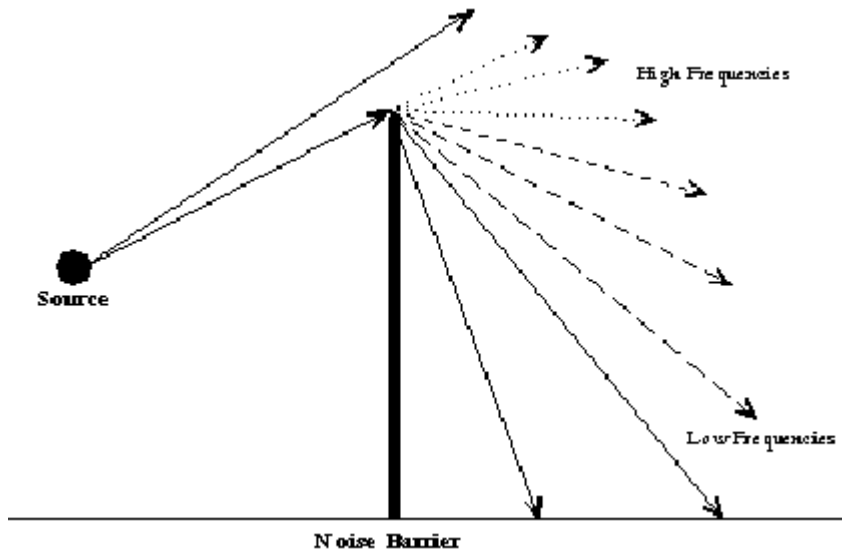
Ääntä heijastava meluaita heijastaa kohti tulevan ääniaallon pois päin suojattavasta kohteesta. Alla oleva kuva selventää heijastavan meluaidan toimintaperiaatetta.



Kuva 2. Heijastavan meluaidan toimintaperiaate. Melulähteestä (source) aiheutuvat ääniaallot kohtaavat edetessään meluaidan (barrier) ja heijastuvat takaisin tulosuuntaansa (reflected sound). Ääniaallot, jotka eivät kohtaa meluaitaa, jatkavat etenemistään (direct sound). Tumman harmaan alueen pitäisi näin ollen olla hiljaista aluetta (shadow zone), mutta äänen taipumisen vuoksi näin ei ole. Havaintaja (receiver) aistii meluaidan huipun kohdanneet ääniaallot, jotka ovat taipuneet (diffracted sound). [14]

Täplällä merkitty melunlähde, esimerkiksi maantiellä ajavat ajoneuvot, aiheuttaa ääniaaltoja, jotka edetessään kohtaavat meluaidan. Seinän kohdatessaan ääniaallot heijastuvat takaisin tulosuuntaansa. Ääniaallot, jotka eivät kohtaa seinää, jatkavat kulkuaan eteenpäin. Kuvassa olevan harmaan alueen pitäisi näin ollen olla melulta suojaisaa alu-

etta. Näin ei kuitenkaan ole, sillä ääni taipuu kohdatessaan meluaidan huipun. Tätä äänen taipumista kutsutaan diffraktioksi [13], jota selventää kuva 3.



Kuva 3. Ääniaallon taipuminen eli diffraktio. Ääniaallon kohdatessa esteen reunan, esimerkiksi talon kulman tai tässä tapauksessa meluaidan huipun, se taipuu eli diffraktoituu. Matalat taajuuudet (low frequencies) taipuvat enemmän kuin korkeat (high frequencies), sillä niillä on suurempi aallonpituus. [15]

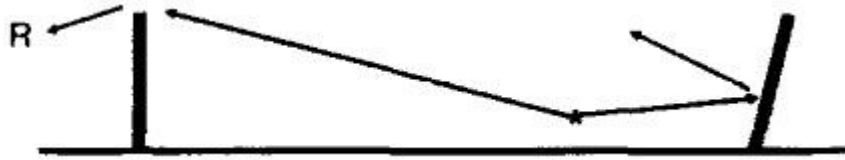
Varsinkin pienitaajuinen ääni, jolloin aallonpituus on suuri, taipuu herkästi esteen kohdatessaan. Heijastavan meluaidan toinen ongelma on nimenomaan äänen heijastuminen takaisin tulosuuntaansa. Tämä voi aiheuttaa äänen intensiteetin lisääntymistä tien toisella puolella, jolloin siellä sijaitsevien asuin- tai virkistysalueiden melutaso voi nousta suositusten yläpuolelle.

2.2.2 Ääntä absorboiva meluaita

Ääntä absorboivassa meluaidassa ei esiinny yllä mainittua äänen heijastusongelmaa [16], sillä ideaalitapauksessa aidan materiaali absorboi kohti tulevan ääniaallon kokonaan itseensä eikä heijasta sitä takaisin tulosuuntaansa. Muuten toimintaperiaate on samanlainen kuin heijastavassakin meluaidassa, eli ääntä absorboiva aidan materiaali ei kuitenkaan poista äänen diffraktiosta aiheutuvaa ongelmaa.

2.2.3 Diffraktiota ja äänen heijastumista vähentävä meluaita

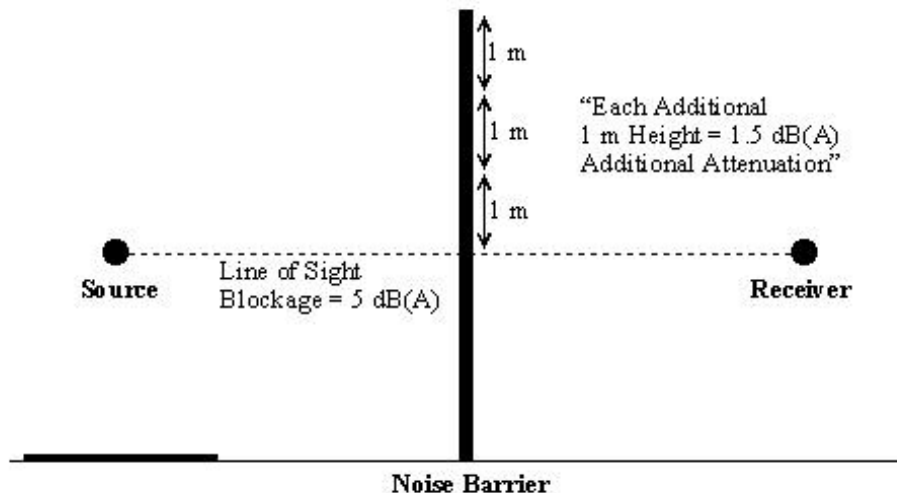
Ääntä heijastavan meluaidan aiheuttamaa äänen heijastumista tien toiselle puolelle voidaan pyrkiä vähentämään esimerkiksi erilaisilla aidan kallistuksilla (Kuva 4). [16]



Kuva 4. Heijastuksen vähentäminen aidan kallistamalla. Ääntä heijastavan aidan aiheuttamaa intensiteetin kasvua tien toiselle puolelle voidaan vähentää aidan kallistuksella, jolloin heijastunut ääniaalto suuntautuu hieman enemmän ylöspäin kuin pystysuorassa aidassa. Näin suurempi osa heijastuneesta äänestä suuntautuu ylöspäin. [16]

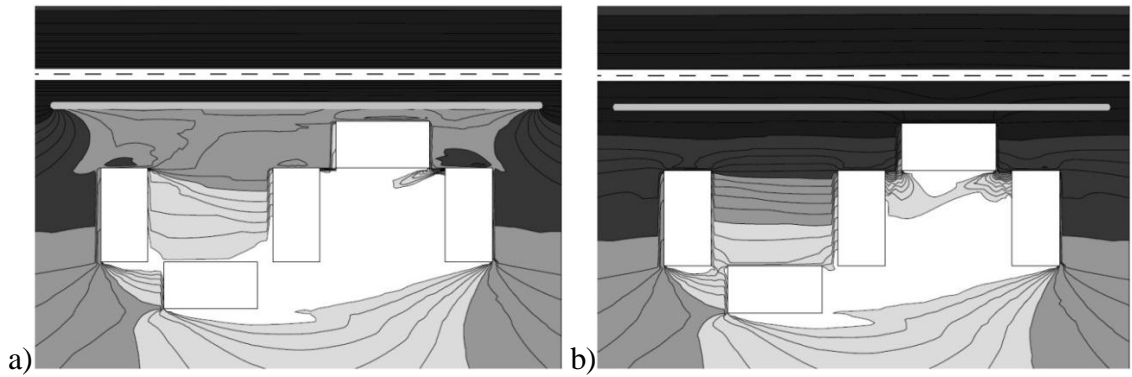
G. R. Watts [16] suoritti kokeiluja aidan kallistuksilla 5° , 10° ja 15° vertikaalitasoon nähden, ja havaitsi tämän pienentävän heijastuneen ääniaallon voimakkuutta tien toisella puolella.

Diffraktiosta aiheutuvia meluhaittoja voi vähentää rakentamalla korkeamman meluaidan, sillä mitä korkeampi aita on, sitä pienitajuisempi ääni jää taipumatta sen yli. Kustannukset kuitenkin nousevat myös korkeiksi. Yhden metrin lisäys korkeuteen vähentää melua aidan toisella puolella noin 1,5 dB, kuten alla olevassa kuvassa esitetään. [2, 15]



Kuva 5. Meluaidan korkeuden vaikutus melun vähentämiseen. Yhden metrin lisäys meluaidan korkeuteen vähentää toisella puolella aistittavan melun voimakkuutta noin 1,5 dB. Kolmen metrin korotus vähentää melun voimakkuutta 4,5 dB. [15]

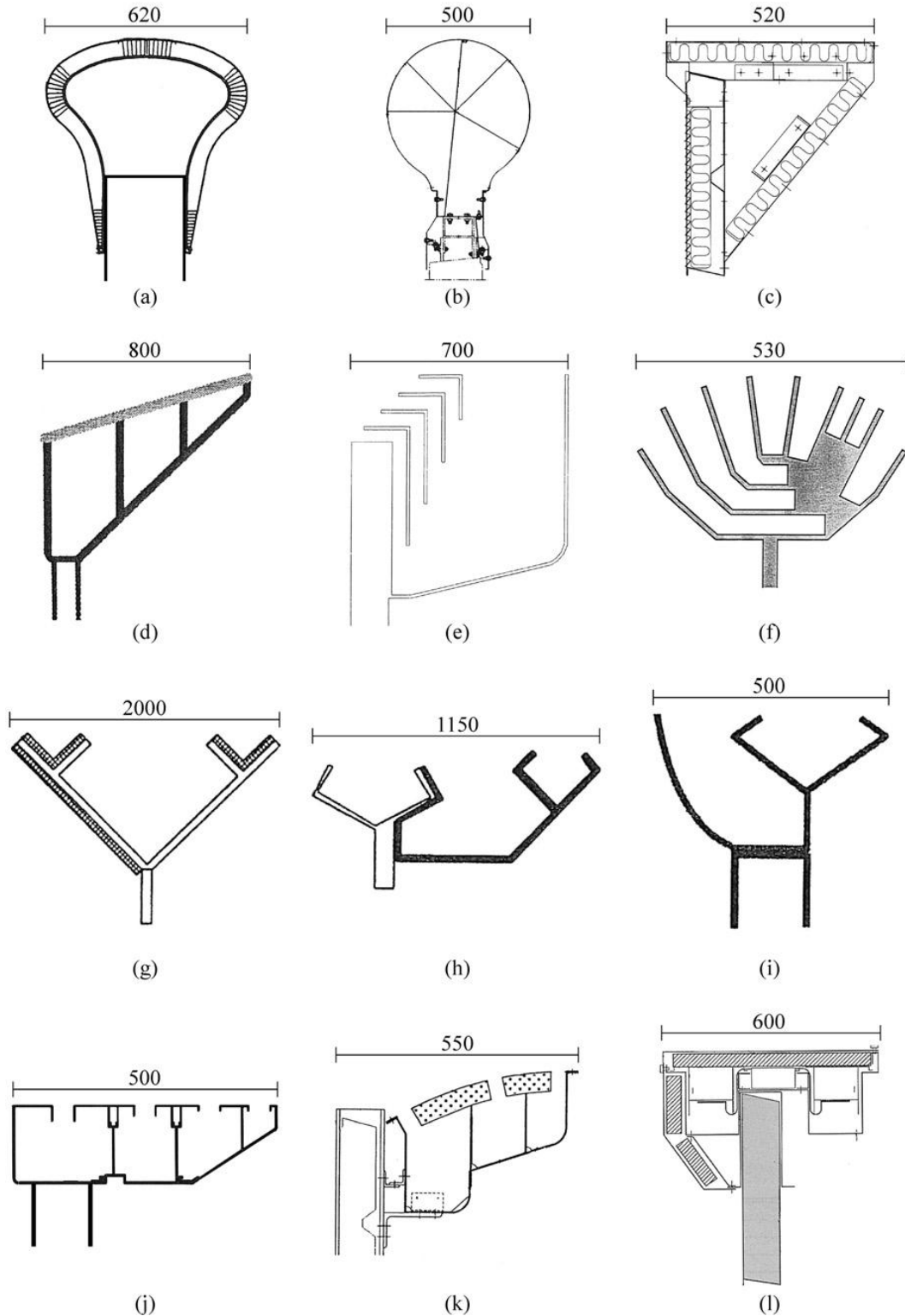
Aidasta pitäisi kuitenkin rakentaa hyvin korkea, jotta voitaisiin suojata esimerkiksi kerrostalojen ylimpiä kerroksia melulta. Kuvissa 6a ja 6b on havainnollistettu, kuinka aidan korkeus vaikuttaa melutasoon eri korkeuksilla.



Kuva 6. Keskiäänitaso 2 m ja 8 m korkeudella. Molemmissa kuvissa 2,5 m korkea meluaita sijaitsee 10 m päässä tien keskilinjasta. Kuvassa a) havaintopiste on vasemmanpuoleisella pihalla 2 m korkeudella maanpinnasta, jolloin meluaita alentaa melun keskiäänitasoa noin 10 dB. Kuvassa b) havaintopiste on vasemmanpuoleisella pihalla 8 m korkeudella maanpinnasta, jolloin aidan tuottamaa vaimennusta melutasoon ei ole juuri lainkaan havaittavissa. [11]

Kuvissa 2,5 m korkea meluaita sijaitsee 10 m tien keskilinjasta. Kuvassa 6a se alentaa vasemmanpuoleisen pihan keskiäänitasoa 2 m korkeudella maanpinnasta noin 10 dB. Kuvassa 6b sama meluaita ei vaikuta vasemmanpuoleisen pihan melun keskiäänitasoon juuri lainkaan 8 m korkeudella. [11] Kuvan 5 mukaisilla metrin lisäyksen tuottamalla 1,5 dB melutason vähennyksillä aidan pitäisi olla 10 m korkea, jotta saavutettaisiin 10 dB vaimennus myös 8 m korkeudella.

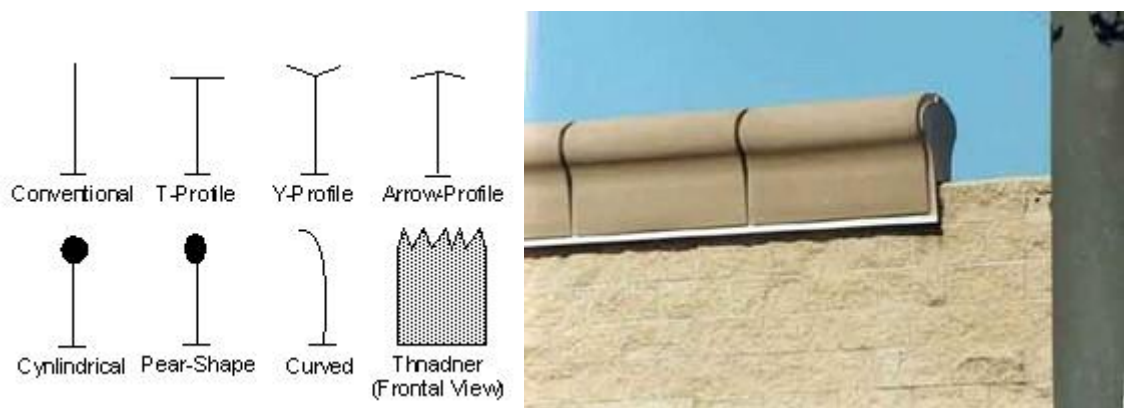
Diffraaktion vähentämiseksi on kokeiltu erilaisia aidan yläreunan muotoiluja sekä laitteita. Esimerkiksi Japanissa on käytössä arviolta noin 20 erilaista aidan yläreunaan asennettavaa muotokappaletta tai laitetta, joiden avulla pyritään vähentämään diffraktiota. Alla olevassa kuvassa on esiteltyä niistä 12. [17]



Kuva 7. Diffraktiota vähentäviä yläreunan muotoelementtejä ja laitteita, joiden avulla äänen taipumista vähennetään absorptioon, interferenssiin ja resonanssiin avulla. [17]

Laitteet ja muotoelementit vähentävät diffraktiota muun muassa absorption, interferenssin ja resonanssin avulla. Esimerkiksi diffraktioelementin avulla pyritään taittamaan tai heijastamaan ääni takaisin tielle tai ylöspäin. On kokeiltu myös äämentunnistinmikrofoneista, digitaalisen signaalin käsittelylaitteista ja kaiutinelementeistä koostuvia aktiivisia äänenhallintajärjestelmiä, jotka vaimentavat melun vastaäänellä. Jos meluidan huipulla on tietyllä amplitudilla oleva äänenpaineen tihentymä, pyritään siihen tuottamaan samalla amplitudilla oleva äänenpaineen harventuma. [17, 18].

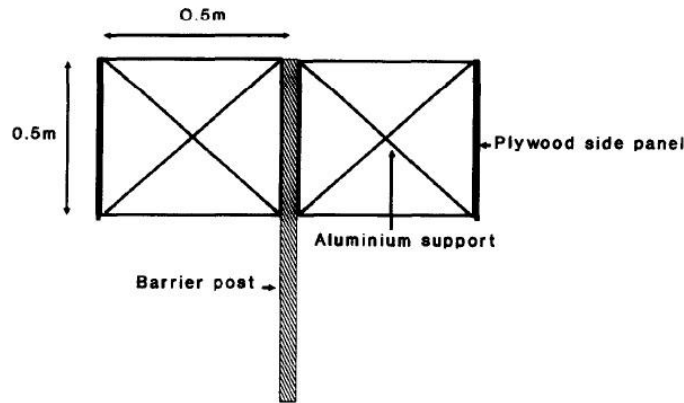
Perinteisempi keino diffraktion vähentämiseksi on käyttää meluidan harjalla erilaisia muotoja. Kuvassa 8 on vasemmalla muutamia yleisesti käytössä olevia meluidan yläreunan muotoiluja ja oikealla on nähtävissä, miltä yläreunaan asennettava erillinen muotokappale näyttää käytännössä. [15]



Kuva 8. Vasemmalla erilaisia meluidan muotoja, joiden avulla voidaan vähentää diffraktiota. Oikealla päärynän mallinen (pear shape) muotokappale meluidan huipulla. [15]

Yläreunan muotoilun avulla pyritään lisäämään huipulla tapahtuvien diffraktiokertojen määrää, jolloin aidan toiselle puolelle ei heijastu niin paljon melua. Tutkimusten mukaan T-muotoiltu aidan yläreuna on tehokkain äänenvaimentaja. Verrattaessa T-muotoiltua meluaitaa samankorkuiseen ilman muotoilua olevaan aitaan, muotoilun avulla saavutettiin jopa 2,5 dB pienempi melun taso [15]. Suomen olosuhteissa käytettävän T-profiilin on hyvä olla hieman alaspäin taittuva, jotta vesi ei keräänny profiilin päälle. Myös Y- ja nuolimuuotoilu vähentävät äänenvoimakkuutta, mutta eivät yhtä tehokkaasti kuin T-muotoilu. Sylinterimäinen muotoilu, ”päärynämalli” (pear-shape), kaareutuva ja sahalaitainen muotoilu vähentävät äänenvoimakkuutta vain, jos ne ovat ääntä absorboivaa materiaalia. [6, 15]

Myös G. R. Watts [19] totesi tutkimuksissaan diffraktiokertojen lisäämisen vähentävän aidan toisella puolella havaittavan melun määrää. Hänen käyttämänsä prototyyppi, joka perustuu aidan yläreunojen moninkertaistumiseen, oli kuvan 9 mukainen. Elementti ei lisää aidan korkeutta. Tutkimuksissa havaittiin elementin avulla saavutettavan jopa 3 dB pienempi meluhaitta verrattuna tavalliseen meluaitaan.



Kuva 9. Meluaidan huipulle asennettava elementti, joka kasvattaa diffraktiokertojen lukumäärää. Puolen metrin päähän meluaidan (barrier post) huipusta asennetaan 12 mm paksu ja 0,5 m korkea vanerilevy (plywood side panel), joka tuetaan vertikaalitasoon alumiinikehikon (aluminium support) avulla. [19]

Mikäli diffraktion aiheuttamaa meluhaittaa pystytään vähentämään muotoilun tai laitteiden avulla, voidaan valmistaa hieman matalampia meluaitoja, joka yleisesti ottaen on estetiikan kannalta huomattavasti parempi vaihtoehto kuin korkeat meluaidat. [6, 15]

2.3 Vaatimukset

Meluaidan valmistajan on otettava huomioon useita vaatimuksia, jotka meluaidan on täytettävä. Aidalla on oltava riittävät akustiset ominaisuudet, lujuusominaisuudet ja sen on täytettävä myös muita ehtoja. [6] Seuraavissa kappaleissa esitellään meluaidalta vaadittavia ominaisuuksia.

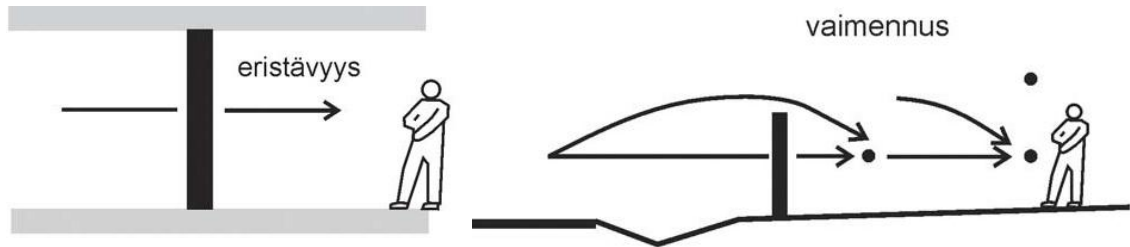
2.3.1 Akustiset ominaisuudet

Meluesteen tarkoitus on vaimentaa melua suojattavassa kohteessa. Tämän vuoksi meluaidoilta vaaditaan tietynlaisia akustisia ominaisuuksia. Äänen eristävyys kuvaa seinän läpi kuuluvaa ääntä (Kuva 10). Mitä suurempi eristävyyttä kuvaava luku, sitä paremmin seinä eristää ääntä. Laboratoriossa mitatut meluaitojen ääneneristävyydet ovat suuruusluokaltaan 15 – 40 dB. [6] Saatujen tulosten mukaan meluaidat jaetaan seuraaviin luokkiin:

Taulukko 1. Laboratoriossa mitatut ääneneristävyyden luokat [20]

Kategoria	Ääneneristävyys [dB]
B0	Ei määritelty
B1	<15
B2	15 – 24
B3	>24

Aitojen ääneneristävyyden kohtuullinen vähimmäistaso on 20 – 25 dB [6]. Tätä suuremmilla arvoilla aidan rakenteen vaikutus saavutettavaan vaimennukseen on erittäin pieni, sillä vaimennus riippuu ensisijaisesti meluidan sijainnista, korkeudesta, pituudesta sekä suojattavan kohteen sijainnista ja korkeudesta (kuva 10).



Kuva 10. Eristävyys ja vaimennus. Äänen eristävyys tarkoittaa aidan läpi kuuluvaa ääntä. Vaimennus tarkoittaa äänilähteen ja havaintopisteen välillä tapahtuvaa äänenvoimakkuuden vaimenemista. Saavutettava vaimennus riippuu aidan eristävydestä sekä melulähteen, meluesteen ja havaintopisteen sijainneista. [6]

Mitä pidemmän matkan ääni kulkee, sitä enemmän se vaimenee. Saavutettava vaimennus riippuu siis melulähteen, meluesteen ja havaintopisteen sijainneista. Esimerkiksi laboratoriossa mitatulla äänen eristävyyden arvolla 28 dB ei siis saavuteta yhtä suurta vaimennusta käytännön kohteissa. Periaatteena on, ettei aidan ääneneristävyys saa heiketä vaaditun tason alle aidan suunnitellun käyttöiän aikana. Eristävyyden heikentymistä voi aiheuttaa esimerkiksi aidan rakoilu. Eristävyystason säilyminen voidaan osoittaa käyttökokemusten tai materiaalistandardien avulla, jotka osoittavat, ettei materiaaliin tai rakenteeseen tule rakoja, reikiä tai painon menetyksiä käyttöiän aikana. Tarvittaessa koe-kappaleeseen voidaan tehdä ennustettavissa olevat raot ja vauriot ja tämän jälkeen mitataan eristävyys uudelleen. [6] Myös vallitsevilla sääolosuhteilla, kuten tuulella ja ilman lämpötilalla, on vaikutusta äänen etenemiseen ja siten myös meluidan tehokkuuteen [15].

Ääntä imevinä eli absorboivina aitoina saa mainostaa vain tuotteita, jotka on testattu laboratoriossa. Poikkeuksena on kuitenkin maavalli, sitä pidetään aina ääntä absorboivana. [6] Absorptio jaetaan taulukon 2 mukaisiin luokkiin:

Taulukko 2. Laboratoriossa mitatut äänen absorption luokat [21]

Kategoria	Äänen absorptio [dB]
A0	Ei määritelty
A1	<4
A2	4 – 7
A3	8 – 11
A4	>11

Töhrimisen estämiseksi meluaidan tilaajan suunnitelmassa voi olla rimoitus suojaamaan meluaitaa. Rimoituksen vaikutusta äänen absorptioon ei tarvitse erikseen tutkia. Luokkien A1 ja A2 meluaitoja ei varsinaisesti luokitella ääntä absorboiviksi aidoiksi. Luokan A3 tai A4 mukaista meluestettä olisi hyvä käyttää ainakin kun vilkasliikenteisen ajotien ja meluaidan välissä on kevyen liikenteen väylä tai tien vastakkaisella puolella on asutusta, jonka meluhaittaa heijastava meluaita lisää. [6]

G. R. Watts [16] tutki testijärjestelyn avulla tapausta, jossa tien molemmiin puoliin on pystytetty meluaita. Aitojen väliin asetettiin kaiutin kuvaamaan liikenteen melua ja mikrofonit asetettiin toisen aidan taakse asutuksen puolelle. Ensin mitattiin kaiuttimen aiheuttama meluhaitta siten, että vain kaiuttimen ja mikrofonin välissä oli heijastava meluaita. Tämän jälkeen tien toiselle puolelle asetettiin yhtä korkea heijastava meluaita ja mittaus toistettiin. Meluhaitta mikrofonin luona kasvoi 3,1 dB. Seuraavaksi kauniimmaisena meluaidan tilalle vaihdettiin yhtä korkea ääntä absorboiva aita. Mittausten tuloksena meluhaitta nousi mikrofonin luona vain 0,3 dB alkuperäiseen (yhden aidan) tulokseen verrattuna. Sään vaikutus tuloksiin huomioitiin normalisoimalla tulokset tuulen osalta. [16] Myös erilaisilla laskennallisilla malleilla ja laboratorio- ja pienoismallitesteillä on saatu vastaavia hyviä tuloksia absorboivien aitojen käytöstä. [22, 23]

2.3.2 Lujuusvaatimukset

Akustisten ominaisuuksien lisäksi meluaidalta vaaditaan myös riittävät lujuusominaisuudet erilaisten kuormitusten varalta. Aidan on kestävä esimerkiksi tuulen ja ohiajajien ajoneuvojen aiheuttamia voimia sekä kivien ja satunnaisesti myös autoista lentävien osien, esimerkiksi pölykapselien, iskuja. Myös aidan oma paino aiheuttaa kuormitusta. Talvisin aidan on kestävä aurausta ja lumikuormia. Standardissa SFS-EN 1794-1 (Road traffic noise reducing devices. Nonacoustic performance. Part 1: Mechanical performance and stability requirements) on määritelty meluaidan rakennetekniset vaatimukset. Myöskään nämä lujuusvaatimukset eivät saisi heiketä aidan käyttöiän aikana, kuten eivät edellä mainitut akustisetkaan ominaisuudet. [24]

Tuulikuormitus. Meluaitaan kohdistuu tuulen sekä ohiajajien kulkuvälineiden aiheuttamia kuormituksia. Aidan on kestävä ne ilman suuria taipumisia. Standardissa SFS-EN 1991-1-4 on määritelty laskelmissa käytettävät maakohtaiset tuulen nopeuden arvot. [24] Standardi SFS-EN 1991-1-4 sisältää runsaasti kaavoja ja arvoja eri tilanteisiin. Tämä mahdollistaa täsmällisenkin tuulikuormitusten määrittelyn. Käytännössä suunnittelijan on kuitenkin yksinkertaistettava kuormitusten laskentaa. Standardissa on myös määritelty erilaiset maastoluokat, joissa käytetään erilaisia tuulenpaineen ominaisarvoja. [6] Testissä meluaita asennetaan vaakatasoon ja sen päälle laitetaan teräslevy. Tämän jälkeen mitataan sen aiheuttama taipuma aidassa. Tarkemmat määritelmät ja ohjeet ovat standardin SFS-EN 1794-1 liitteessä A. [24] Meluaidan tukipilari saa taipua tuulen vaikutuksesta vaakasuunnassa korkeintaan $h/100$, kun meluaidan korkeus (h) on enintään 3 m. Taipuma saa olla 30 mm meluaidan korkeuden ollessa välillä 3 – 4,5 m ja $h/150$, kun meluaita on yli 4,5 m korkea. Seinäelementin vaakasuoralle taipumiselle asetetaan rajat: tukipilariväli/40, kun elementin tukipisteväli on enintään 2 m; 50 mm,

tukipistevälin ollessa 2 – 5 m ja tukipilariväli/100, kun tukipisteväli on 5 m suurempi. Mikäli meluaita ei ole pystysuora, vaan esimerkiksi kalteva, on tuulikuormitukseen yhdistettävä seinän oma paino sekä päälle kertyneen lumen paino. [6, 24] Tuulen aiheuttaman taipuman aidassa voi myös laskea. Laskelmia varten on tiedettävä aidan mitat, mukaan lukien kaikki tukielementit, aidassa käytetyt materiaalit ja niiden kimmomoduulit sekä muut materiaaliominaisuudet. Tietysti on myös ymmärrettävä laskumenetelmän perusteet. [24]

Värinän ja väsytyksen aiheuttamat vaikutukset. Jos meluaita sijaitsee tunnelissa tai hyvin lähellä tien reunaa, voi ohiajajien ajoneuvojen muodon, nopeuden ja etäisyyden sekä aidan muodon yhteisvaikutuksena syntyä paineenvaihtelua sykleissä, joka voi johtaa meluaidan väsymiseen. Standardissa SFS-EN 1794-1 on määritelty erilaisia parametreja tämän kuormituksen laskemiseksi. [24]

Oma paino. Meluaidan on kestettävä oma painonsa sekä siihen kertyvä veden ja lumen paino murtumatta tai taipumatta liikaa. Taipumien rajoittaminen on tärkeää, jotta ei tapahdu akustisia vuotoja, aidan korkeuden madaltumista tai tukirakenteiden ylikuormittumista. Seinäelementin painoa kuivana käytetään ääneneristävyyden arviointiin. Jos seinäelementti voi absorboida vettä, käytetään märkäpainoa elementtien sekä tukirakenteiden suunnitteluun. Oman painon aiheuttaman kuormituksen voi testata käytännössä, kuten tuulikuormituksen, tai sen voi laskea. [6, 24]

Iskunkestävyys. Minimivaatimuksena meluaidan on kestettävä pienet kiveniskut. Tätä varten on määritetty laboratoriotestit, joiden avulla voidaan varmistaa riittävä iskunkestävyys meluaidalle. Tämä testi ei kuitenkaan riitä kattamaan raskaampia iskuja eikä ilkvallantekoja. Iskutesti suoritetaan pistemäisellä teräsvasaralla käyttäen iskuenergiana 30 Nm. Isku kohdistetaan meluaidan ulkokuoreen kolmeen kohtaan: nurkkaan, keskelle sekä sattumalta valittuun kohtaan. Isku saa aiheuttaa testattavan kappaleen ulkokuoreessa vain pienen lommon tai halkeaman, sisäosa ei saa vahingoittua. Kylmässä hauraat materiaalit mitataan -20 °C lämpötilassa. [24] Voidaan olettaa, että Suomen oloissa seuraavat materiaalit täyttävät kimmovasaratestin vaatimukset: normaali betoni, vähintään 20 mm paksu lauta, vähintään 12 mm paksu vaneri sekä vähintään 1 mm paksu teräs- tai alumiinilevy. Suomessa voidaan sallia myös iskutesti, joka suoritetaan pudottamalla 1,5 kg tylppä terästanko 2 m korkeudelta. Iskut kohdistetaan meluesteen keskelle ja noin 125 mm etäisyydelle nurkista. Edellä mainittu testi ei ole voimassa lasista valmistetuille tuotteille. Mikäli melueste sijaitsee ilkvallalle alttiilla paikalla, on sille hyvä suorittaa standardin SFS-EN 1794-2 mukainen putoavien osien testi. [6]

Törmäykset. Yleisesti meluesteeltä ei vaadita törmäyskestävyyttä. Ajoneuvojen törmäystä meluaitaan voidaan ehkäistä rakentamalla meluaita riittävän kauas tiestä tai sijoittamalla tien ja meluaidan väliin törmäyskaide. Mikäli kumpakaakaan näistä ei ole mahdollista toteuttaa ja vaaditaan luokkaa, jossa törmäyksen pitää olla autossa oleville turvallinen, on meluaidan turvallisuus osoitettava törmäyskokeella. Koe suoritetaan standardien SFS-EN 1317-1 ja -2 mukaisesti, noudattaen standardin SFS-EN 1794-1 liitteen D mukaisia ohjeita. [6, 24]

Lumi- ja aurasuorma. Suomessa meluaidan on talvisin kestävä myös teiden aurauksesta aiheutuvaa lumikuormaa. Kuormitusta aiheuttavan lumen määrä ja kuinka korkealle aitaan se osuu, riippuu aura-auton mallista ja nopeudesta sekä aidan sijainnista tiehen nähden. Mikäli aita on 7 metriä kauempana tiestä, voidaan tuulikuormituksen olettaa olevan lumikuormitusta suuremman, jolloin lumen aiheuttamaa kuormitusta ei tarvitse huomioida. Aurasuormaa ei myöskään tarvitse ottaa huomioon kevyen liikenteen väylillä. Lumen aiheuttama kuormitus on suurinta silloin, kun korkea meluaita on pystytetty tietä alemmalle pohjalle. Standardin SFS-EN 1794-1 liitteessä E on määritellyt parametreja lumikuormituksen laskemiseksi. Parametrit riippuvat meluaidan etäisyydestä tiehen sekä aura-auton nopeudesta. [6, 24] Kuormitusta voi testata myös sisätiloissa. Tällöin meluaita asennetaan vaakatasoon kuten tuulikuormitustestissäkin, mutta kuormana käytetään hiekalla täytettyjä säkkejä. Säkkien paino määritetään standardin avulla. [24]

2.3.3 Muut vaatimukset

Vaikka meluaidan toiminnan kannalta tärkeimmät vaatimukset ovat akustiset ja lujuusvaatimukset, täytyy aidan olla myös muilta osin turvallinen eikä siitä saa olla haittaa tien käyttäjille tai muille henkilöille aidan läheisyydessä. Aita ei saa myöskään aiheuttaa ympäristöhaittoja. Standardissa SFS-EN 1794-2 (Road traffic noise reducing devices. Nonacoustic performance. Part 2: General safety and environmental requirements) määrittellään meluaidan muut turvallisuuden kannalta oleelliset vaatimukset. Näitä ovat muun muassa paloturvallisuus, ympäristön vahingoittamattomuus, aidassa sijaitsevat hätäuloskäynnit sekä valon heijastumattomuus aidasta. [25] Tämän lisäksi on huomioitava aidan ulkonäkö, kestoikä, puhdistettavuus ja korjattavuus. [6, 15, 25]

Paloturvallisuus. Meluaita voi altistaa tulelle maasto- tai ruohikkopalojen tai il-kivallan seurauksena. Tämän vuoksi on testattava meluaidan palonarkuutta. Testiä varten valmistetaan kaksi palonlähdettä, 3 mm paksusta teräslangasta valmistetut 300 mm x 200 mm ja 300 mm korkeat verkkokorit, jotka täytetään 600 grammalla palavaa materiaalia. Palava tätemateriaali koostuu 0,2 mm paksuista ja 2 mm leveistä, noin 50 mm pitkistä kuusen lastuista. Lastuissa ei saa olla tikkuja ja lastujen kosteusprosentti saa olla maksimissaan 30 %. Testattava meluaidan paneeli tuetaan jalustalla asentoon, jossa se on käytössäkin. Palonlähteinä toimivat korit asetetaan paneelin vierelle pitempi sivu paneelia vasten. Molemmat palonlähteet sytytetään samanaikaisesti. Testi on ohitse, kun palonlähteet ja mahdollisesti niiden seurauksena syttyneet paneelin osat ovat sammuneet. Testi suoritetaan aidan molemmille puolille. Testin jälkeen meluaita voidaan luokitella seuraavasti: luokassa 3 aidassa tapahtuu vain värimuutoksia; luokassa 2 vahingoittunut alue on pienempi kuin 0,06 m² eikä ylety 200 mm korkeammalle alkulähteestä, eikä palo ole levinnyt paneelin toiselle puolelle; luokassa 1 vahingot ovat suuremmat kuin edellisissä luokissa. [25] Herkästi syttyviä materiaaleja ovat esimerkiksi osittain näkyvissä oleva muovinen verkko tai kalvo, jonka voi ylettyä sytyttämään tulitikulla tai joka voisi syttyä ruohikkopalosta sekä puinen tai muovinen säleikkö, jonka samansuuntaisten säleiden välimatka on alle 50 mm ja säleiden paksuus alle 30 mm. Meluaidassa

on oltava vähintään 8 m pituinen palamaton osuus, mikäli yhtenäisen meluseinän pituus on yli 1 km tai se yhdistää kaksi eri kiinteistöllä olevaa rakennusta. Palamaton osuus voi olla betoninen tai teräksinen meluaita, jossa saa olla enintään 20 puista pystyrimaa kyseisellä 8 m matkalla tai metallinen meluaita, jossa on enintään 0,7 mm paksuinen hiitaasti palava muovipinnoite. [6]

Putoavat osat. Mikäli meluaita sijaitsee esimerkiksi sillalla tai muuten huomattavasti tietä korkeammalla tai jos meluaita on ilkvallalle alttiilla paikalla, on aidalle tehtävä asianmukainen testaus putoavien osien varalta, sillä tällöin aidasta ei saa esimerkiksi kovienkaan törmäysten seurauksena pudota osia tienkäyttäjien päälle. [6, 25] Testi voidaan suorittaa käyttämällä iskuenergian arvoja 6,0 kJ tai 0,5 kJ (suluissa). Testi suoritetaan heilauttamalla 400 kg (45 kg) teräskuutio kulma edellä 1,5 m (1,1 m) korkeudelta nopeudella 19,5 km/h (16,7 km/h) testikappaleen keskikohtaa tai muuten haurainta osaa päin. Heilurin säteen on oltava vähintään 4 m. Testattavan meluidan elementin on oltava tuettuna siten, kuin se tulee olemaan tuettuna myös käytössä. Vain ensimmäisessä heilurin törmäyksessä irronneet pirstaleet otetaan huomioon. Irronneille osasille on asetettu muutamia kriteereitä, jotka eivät saisi toteutua: osasen pinta-ala suurempi kuin 25 cm² ja jonka paino on yli 100 g; osan pituus yli 15 cm; osa, jossa on alle 15° kulmia ja joka painaa yli 100 g; osan paino yli 400 g; terävä osa, joka on alle 1 mm paksu ja painaa yli 100 g. Luokittelu riippuu siitä, millä iskuenergialla törmäys on toteutettu sekä siitä, onko aidasta irronnut osia törmäyksen seurauksena ja täyttävätkö nämä irronneet osaset asetettuja kriteereitä. [25]

Ympäristönäkökohdat. Meluesteestä ei saa olla haittaa ympäristölle. Tämän vuoksi aidassa käytetyt materiaalit on ilmoitettava käyttäen kemiallisia nimiä kaupanimien sijaan. On ilmoitettava myös mahdollisista rakentamisen ja käytön aikana aidasta irtoavista haitallisista aineista sekä tulipalon varalta myös myrkylliset palamis-kaasut. On myös hyvä kertoa, mikäli aita tai jokin sen osa on valmistettu kierrätetystä materiaalista. Selvitys aidan hävittämisen- tai uusiokäyttömahdollisuuksista ei ole pakollinen, mutta se on kyettävä antamaan, jos sellaista pyydetään. [6, 25]

Hätäuloskäynnit. Mikäli moottoritiellä on yli 2 km pitkä yhtenäinen jakso, jossa korkeat meluidat, vallit, tukimuurit tai kaiteet estävät poistumisen tiealueelta, on meluaitaan sijoitettava poistumisovi 1 km välein. Muiden kuin moottoriteiden osalta tätä noudatetaan, kun tien molemmin puolin on vastaavanlainen kulun estävä rakenne. Poistumisoven on oltava vähintään 2,1 m korkea ja 0,9 m leveä [25]. Myös pelastusviranomaisilta on hyvä kysyä heidän vaatimuksiaan ja toiveitaan hätäuloskäyntien koolle ja sijoittelulle. Meluaitaan rakennettava ovi saa aueta vain tien puolelta ja sen on oltava itsestään sulkeutuva. Myös huollontarpeen tulisi olla vähäistä sekä huoltotoimenpiteiden helposti toteutettavissa. Ovi ei saa myöskään heikentää meluidan ensisijaista tarkoitusta. Hätäuloskäyntinä voi käyttää oven sijasta myös limitettyjä aukkoja aidassa. [6, 25]

Valon heijastuminen aidasta. Valo heijastuu kaikilta tasaisilta pinnoilta. Heijastuksen suuruus riippuu heijastuskulmasta. Suurilla heijastuskulmilla auringonvalo tai ajoneuvon valot yöllä voivat häikäistä autonkuljettajaa ja näin vaikuttaa tienkäyttäjien turvallisuuteen. Heijastuksesta johtuvat ongelmat ovat enimmäkseen paikka- ja tuote-

kohtaisia, mutta siihen on silti kiinnitettävä huomiota meluaitaa suunniteltaessa. Heijastustestiä varten tarvitaan standardin SFS-EN ISO 2813 mukainen laite ja testi suoritetaan samaisen standardin mukaisesti, noudattaen standardissa SFS-EN 1794-2 annettuja ohjeita. Meluaidan pintamateriaalille (vähintään 150 mm x 300 mm kokoiselle paneelille) suoritetaan 10 heijastavuuden mittausta kulmilla 20°, 60° ja 85°. Saatujen tulosten perusteella voidaan luokitella meluaidan heijastavuus. [25]

Ulkonäkö. Meluaidan ulkonäkö koskettaa useita ihmisiä; tienkäyttäjiä ja lähistöllä asuvia tai päivittäin asioivia ihmisiä. [15] Tämän vuoksi on kiinnitettävä erityistä huomiota meluaidan materiaaleihin, arkkitehtuuriin (muoto, kuviot, värit jne.) ja maisemointiin, sillä vaikka tien puolella mahdollisia virheitä ei helposti huomaisikaan, on aivan eri asia katsella takapihaltaan 50 metrin päässä olevaa meluaitaa 20 vuotta. [4, 15] Standardissa SFS-EN 1794-2 on vielä lisähuomioita läpinäkyvän meluaidan osalta [25].

Kestoikä. Meluesteen käyttöikä voi hyvinkin olla 40 - 50 vuotta, joten materiaalinvalinnassa sekä aidan rakenteen suunnittelussa on oltava huolellinen. Suunnittelukestokävaatimus perustusten, rungon ja kantavien rakenteiden osalta on 50 vuotta (puurungon osalta 40 vuotta); vaihdettavan rimoituksen, ääntä absorboivan huokoisen materiaalin ja sauma-aineiden osalta vähintään 15 vuotta ja läpinäkyvien rakenteiden osalta 20 vuotta. Yleensä huokoisilla materiaaleilla ei saavuteta yli 15 vuoden kestoikää luotettavasti. Tämän vuoksi äänen absorption perustuessa villoihin ja mikäli valmistajalla ei ole tarkempaa hoito-ohjetta, 10 vuoden kuluttua aidan rakentamisesta tarkistetaan, ulottuvatko villat meluaidan yläosaan asti. Tämän jälkeen tarkistus suoritetaan viiden vuoden välein. Jos villat ovat valuneet, ne on vaihdettava. [6]

Puhdistettavuus. Meluaita on käyttöikänsä aikana erilaisten sääolosuhteiden vaikutuksen alla. Lisäksi liikenne ja ihminen erilaisilla toiminnoillaan (esimerkiksi graffitit) aiheuttavat meluaidan likaantumista. Tämän vuoksi aitaa saatetaan joutua puhdistamaan. Puhdistuksen tulisi olla helppoa. Tämä on huomioitava suunnitteluvaiheessa, sillä erilaiset pinnanmuotoilut ja -karheudet vaikeuttavat puhdistusta. Toisaalta juuri sileät pinnat ovat alttiita töhrinnälle. Graffitien osalta puhdistamisen tarvetta voidaan ennaltaehkäistä meluaidan eteen sijoitettavilla istutuksilla tai asentamalla esimerkiksi meluaidan eteen verkko tietylle etäisyydelle, jolloin töhriminen vaikeutuu. [3, 15]

Korjattavuus. Meluaitaa joudutaan todennäköisesti korjaamaan sen käyttöiän aikana, johtuen joko edellä mainituista iskuista ja kuormituksista, ilkevälistä, materiaalin ulkonäön rappeutumisesta tai muista syistä. Korjausten suorittamisen tulisi olla mahdollisimman helppoa ja nopeasti toteutettavissa. Tarvetta korjauksille voi myös ehkäistä, esimerkiksi virtaavan tai seisovan veden aiheuttamia ongelmia voi ehkäistä suunnitteleamalla meluaitaan ”salaojituksen”. Esimerkiksi rinteeseen poikittain rakennettuun meluaitaan voi jättää pienet aukot juureen, joista vesi pääsee virtaamaan. [15]

2.3.4 Vaatimukset meluaidan perustuksille

Perinteinen vaihtoehto meluaidan perustukselle on betonipaalu tai pilarimainen perustus, joka upotetaan maahan ja johon kiinnitetään meluaidan tukipilarit. Tukipilareihin kiinnitetään meluaitaelementit. Voidaan käyttää myös teräsputkipaaluja, jotka asenne-

taan lyömällä tai täryttämällä. Raskasrakenteisen meluaidan perustamistapana voi käyttää myös anturalaattoja. [3, 6]

Perustamistavan valinta riippuu meluseinän rakenteesta sekä jännevälistä (eli kahden perustuksen välisestä etäisyydestä, joka puolestaan riippuu seinäelementistä [6]). Kaikissa tavoissa on kuitenkin huomioitava routanousut, meluseinän aiheuttamat kuormitukset perustukseen sekä maasto, johon perustus upotetaan. Tarkempia ohjeita on Tiehallinnon laatimassa oppaassa meluesteperustuksille. [26]

2.4 Meluaidan kustannukset

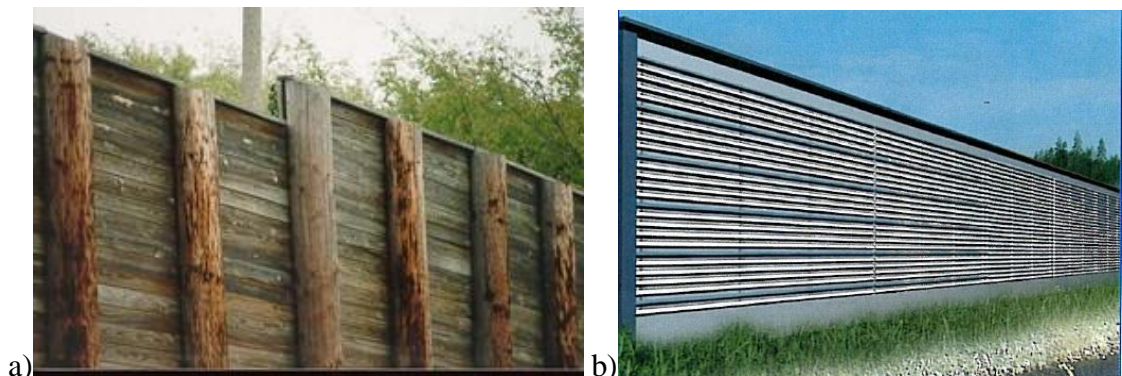
Meluaidan kustannuksiin vaikuttaa aidan runkomateriaali, perustamistapa, jännemitta ja meluaidan korkeus. Seinän rungon jännemitta voi olla puurungolla 4 – 6 m ja teräs- ja betonirungolla 4 – 12 m. Pilarivälinä käytetään kuitenkin aidan ulkonäön vuoksi 4 – 6 m, näin ollen osa pilareista on ns. valepilareita, joiden hinta on myös otettava huomioon kustannuksia arvioitaessa. Aidan jännevälin kasvattaminen vähentää perustusten lukumäärää, jolloin kustannukset pienenevät [27]. Eri runkomateriaalien hintaerot ovat melko pieniä 4 – 6 m jänneväleillä. Materiaalien hintavaihtelut vaikuttavat siihen, mikä runkomateriaalivaihtoehto on kulloinkin edullisin. Kustannuksiin vaikuttaa myös, onko aidan oltava absorboiva vai ei, sillä osa runkomateriaaleista on absorboivia sellaisenaan, osaan absorbointi aiheuttaa lisäkustannuksia. Muita kustannuksia lisääviä seikkoja ovat esimerkiksi arkkitehtuuriset muotoilut, rimoitukset ynnä muut. Kokonaiskustannukset muodostuvat perustuksista, pilareista, runkoelementeistä ja ulkonäön parantamiseen tarvittavista yksityiskohdista, valmistuskustannuksista, materiaalien kuljetuksesta paikan päälle sekä rakennustyöstä. [3, 6]

3 AIDAN MATERIAALIT

Meluaidoissa käytetään monia erilaisia materiaaleja. Materiaalivalinta riippuu useista paikallisista tekijöistä, kuten maastosta, tilasta sekä asutuksen läheisyydestä. Materiaalivalintaan vaikuttavat myös äänenvaimennus- tai absorptio-ominaisuudet, kustannukset, saavutettava ulkonäkö sekä muut edellisessä kappaleessa esitellyt meluaidalta vaadittavat ja toivottavat ominaisuudet. Tässä kappaleessa käydään läpi joitakin yleisimpiä Suomessa käytettäviä meluaidan materiaaleja.

3.1 Puu

Puu on yleisesti suomalaisille mieluinen rakennusmateriaali ja näin on myös meluaitojen kohdalla, melusteitä on rakennettu jopa hirrestä. Lämpökäsittelyllä ja kyllästysaineilla saavutetut paremmat ominaisuudet ovat kasvattaneet puun suosiota meluaidan materiaalina entisestään. [4, 6] Puista meluaitaa suunniteltaessa on kiinnitettävä huomioita erityisesti kestoajan arviointiin sekä puupinnan suojaukseen esimerkiksi kosteudelta. Tämän vuoksi puun upottamista maahan ei suositella, vaan betoniperustuksilla saavutetaan parempi kestoikä. Myös meluaidan akustisten ominaisuuksien säilyminen on huomioitava, esimerkiksi pelkistä laudoista rakennettu meluste säilyttää harvoin ääneneristävyytensä johtuen puun vääntyilystä ja kuivumisesta. Lämpökäsittely parantaa puun mittapysyvyyttä. [3, 6] Puisen meluaidan palonherkkyyteen on myös kiinnitettävä huomiota [15]. Puusta valmistetut meluaidat voivat olla hyvin erinäköisiä keskenään, kuten on nähtävissä kuvissa 11a ja 11b.



Kuva 11. Puusta valmistetut meluaidat voivat olla hyvinkin erinäköisiä keskenään. a) Luonnonmukainen puinen meluaita [15], b) Eridomic Oy:n valmistama vaakarimoitettu ja sävytetty puinen meluaita [27]

Puusta valmistetut meluaidat ovat yleensä ääntä heijastavia, mutta puusta voidaan valmistaa myös ääntä absorboivia meluaitoja. Vanhimmat ääntä absorboivat aidat on rakennettu kertopuusta ja niissä on lasivillatäyte [2]. Suomessa puisia meluaitoja ja –seiniä valmistaa muun muassa Suomen rakennustuote Oy ja Eridomic Oy. Eridomic Oy:n valmistama aita voidaan toteuttaa sekä ääntä heijastavana että absorboivana. [27, 28]

3.2 Betoni

Myös betoni on hyvin yleinen ja monipuolinen meluaitamateriaali. Betonista valmistettu meluaita on erittäin pitkäikäinen ja kestävä. Betoniaita voidaan valmistaa paikallavalulla tai valmiista elementeistä. Painavuutensa vuoksi, etenkin jos aita sisältää tiililaitaosuuk-sia, on aidan perustusten oltava hyvin lujat. [15] Betoniaidan suunnittelussa on kiinnitet-tävä huomioita aidan pakkasenkestävyyteen sekä pinnanlaatuun. Aidan pinnassa on huomioitava myös puhdistusta helpottavat näkökohdat. Myös aidan korjattavuutta on mietittävä. Betoniaidan ulkonäköä voidaan muokata erilaisilla pintakuvioinneilla tai rimoituksella, kuten alla olevassa kuvassa on tehty Rudus Oy:n valmistamalle beto-niaidalle. [3, 15]

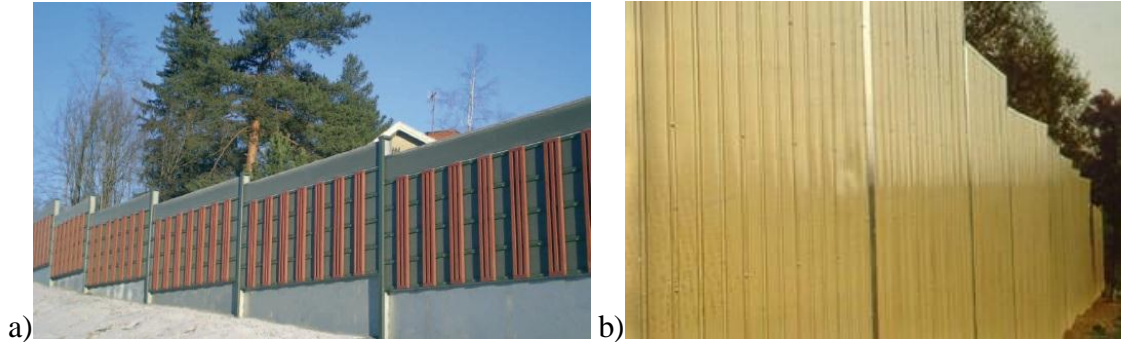


Kuva 12. Betonista valmistettu meluaita Lahdentiellä Helsingissä [29]

Betonista valmistettu meluaita luokitellaan usein ääntä heijastavaksi. Kuitenkin, jos aita on valmistettu huokoisesta betonista tai kevytbetonista, se voi päästä jopa luokkaan A2 tai A3 äänen absorption osalta. [6] Suomessa betonisia meluesteitä valmistaa muun muassa Parma Oy, Rudus Oy, Mikkelin betoni Oy ja Lujabetoni Oy [29, 30, 31, 32]. Näistä Parma ja Rudus valmistavat myös ääntä absorboivaa betoniaitaa. Parman aidassa perus-osana on ontelolaatta, jonka päälle huokoinen ja absorboiva betonimassa muotoillaan liukuvaluna [4]. Ruduksen betoniaitaan on saatavilla ääntä absorboiva pintakerros [29].

3.3 Metalli

Teräs ja alumiini ovat yleisimmin käytettyjä materiaaleja metallisissa meluaidoissa. Metallista valmistettu aita on kevyt, sillä teräsosien minimivahvuuden on oltava vähintään vain 1 mm. Näin ollen metalliset meluaidat ovat käteviä etenkin silloilla. Metallista meluaitaa suunniteltaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota korroosioon, metallin pinnoitukseen ja valon heijastumiseen aidan pinnalta. Aidan pintaa voi maalata, muotoilla sekä rimoittaa yksitoikkoisuuden välttämiseksi, kuten on tehty alla olevassa 13a. [3, 15]



Kuva 13. a) Ruukin valmistama metallinen meluaita, joka on maalattu, rimoitettu ja muotoiltu [33], b) yksinkertainen metallinen meluaita [15]

Yksinkertaisimmillaan ääntä heijastava metallinen meluaita on metallinen levy, kuten kuvassa 13b [15]. Heijastavan meluaidan rakenne voi olla myös ilmatiivis kasetti, jonka sisällä on esimerkiksi polyuretaanivaahtoa [33]. Metallisesta meluaidasta saa ääntä absorboivan, kun kasettielementin tien puoleisen levyn rei'ittää ja kasetin sisämateriaaliksi valitaan ääntä absorboiva materiaali. [2, 33] Suomessa metallisia meluaitoja valmistaa muun muassa Hansa Rakenne Oy alumiiniprofiilista sekä Ruukki ääntä heijastavalla tai absorboivalla teräksestä valmistetulla kasettielementtiratkaisulla. [33, 34]

3.4 Kivi

Kivestä valmistettu meluaita tarkoittaa yleisesti kivikoreista pinottua aitaa. Kivikorit ovat metalliverkkokoreja, joissa on sisällä kivenmurikoita. Kivinen meluaita on erittäin pitkäikäinen, käyttöikää rajoittavaksi tekijäksi muodostuu metallikori. Kivinen meluaita ei myöskään tarvitse sen kummempia perustuksia ja kivikorit kestävät maaperän painumaa paremmin kuin muut ratkaisut, mutta epätasaisessa maaperässä kivikoreista rakennettu meluaita vaatii painumattoman perustuksen. Suurena etuna on, että kivikoriaita ei ole otollinen töhrijoille. Kivisen meluaidan ulkonäköä voi vaihdella käyttämällä verkkokorin metallin pinnalla värejä, istuttamalla köynnöskasveja aidan viereen, latomalla korien avulla erilaisia muotoja tai käyttämällä erivärisiä kivilaatuja, kuten on tehty kuvassa 14a. Kuvassa 14b on Hansa Rakenteen kivikorikone työssään. [6, 15]



Kuva 14. a) Kivikoriaita, jossa on käytetty erivärisiä kivilaatuja [35] b) Hansa Raken-
teen kivikorikone [34]

Kivinen meluaita on yleisesti ääntä heijastava. Mikäli Juha Kuninkaan keksintö luokitellaan kiviaidaksi, silloin kivistä valmistettu meluaita voi olla myös ääntä absorboiva. Kuninkaan aidassa puhalletaan teräsrungon sisään bitumoitua Leca-soraa (eli savesta poltettua kevytsoraa), joka toimii äänieristeenä ja absorptiomateriaalina. Aidan tien puoleisen sivun päällimmäisenä kerroksena on 15 cm silmäkokoinen teräsverkko ja sen alla toinen pienisilmäinen salmiakkikuvioinen verkko. Asutuksen puoleinen sivu on sinkittyä matalaprofiilista peltiä. Ensin pystytetään paalut, runko, pelti ja verkot, jonka jälkeen 10–20 mm kevytsora bitumoidaan asfalttiasemalla ja jäädytetään kylmällä vedellä, jotta rakeet jäävät irtonaisiksi. Bitumoitua Leca-sora puhalletaan kuljetusautosta letkuja pitkin aidan sisään ja aidan päälle kiinnitetään ruostumattomasta teräksestä tehty harja. Ensimmäisillä lämpimillä ilmoilla rakeet tarttuvat kiinni toisiinsa. [18]

3.5 Maavalli sekä puut ja istutukset

Halvin meluaita saadaan maavallilla, jos ei ole maapohjan sortumavaaraa. Se kuitenkin tarvitsee paljon tilaa ympärilleen sekä kovan maapohjan, joten maavallin käyttö tiheästi rakennetuilla alueilla ei onnistu. Maavallia ja meluaitaa voidaan käyttää myös yhdessä, jolloin kummaltakin vaadittava korkeus on pienempi. [3, 10] Maavalleissa käytetään nykyään usein autonrenkaista rouhittua kumia keventämään rakenteita [4]. Maavallia pidetään yleisesti ääntä absorboivana [6].

4 KOMPOSIITTI MELU Aidan MATERIAALINA

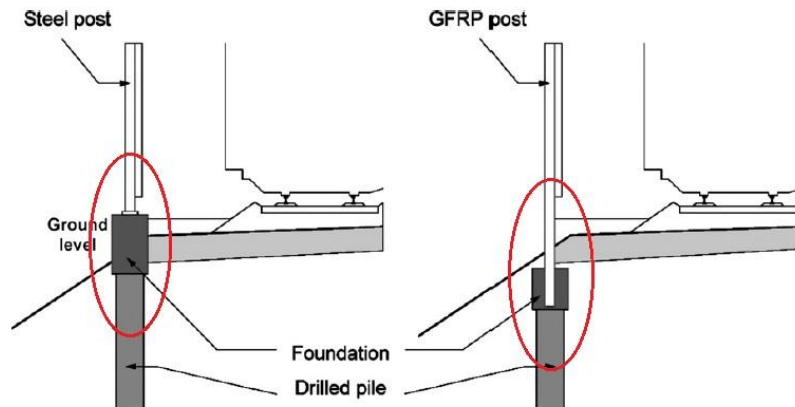
Lujitemuovi on hyvin monipuolinen materiaali. Tässä kappaleessa tarkastellaan lujitemuovista valmistetun meluaidan ominaisuuksia ja etuja verrattuna muihin meluaitamateriaaleihin. Tämän jälkeen tutustutaan erilaisiin ääntä absorboiviin materiaaleihin sekä siihen, mitkä ominaisuudet vaikuttavat materiaalin absorptio-ominaisuuksiin. Lopuksi esitellään olemassa olevia ääntä absorboivia meluaitoja sekä komposiiteista valmistettuja aitoja.

4.1 Edut perinteisiin meluaitoihin verrattuna

Lujitemuovimateriaaleja voi käyttää meluaidoissa kuten puuta tai metallia. Aivan niin kuin muistakin materiaaleista valmistettujen aitojen, on lujitemuovisen meluaidan täytettävä meluaidalle asetetut vaatimukset. Rakenteella on oltava riittävät lujuus- ja iskulujuusominaisuudet erilaisten kuormitusten osalta, ja nämä vaatimukset ovat saavutettavissa käyttämällä lujitemuovia meluaidan materiaalina.

Puiseen ja metalliseen aitaan verrattuna lujitemuoviaidan etuna on sen kosteudenkestävyys. Lujitemuovista valmistettu meluaita ei ruostu eikä lahoa. Tämä johtaa myös pitkään käyttöikänsä [36]. Pitkän käyttöiän saavuttamiseksi on materiaaliin lisättävä UV-valolta suojaavia lisäaineita [6]. Puuhun verrattaessa etuna on myös se, että lujitemuovista valmistettu aita ei vääntyile eikä halkeile kosteuden ja kuivuuden vaihtelun seurauksena, joten se säilyttää akustiset ominaisuutensa pitkään. Lujitemuoviaidan ulkonäön monipuolisuus on mahdollista erilaisten värien, pintojen sekä muotojen avulla. Tärkeänä etuna on myös lujitemuoviaidan keveys: sen asentaminen ja korjaaminen on helppoa, eikä vaadi raskaita laitteita tai välineitä. [36] Lujitemuovi ei myöskään johda sähköä ja tämä saattaa tulevaisuudessa olla kilpailukykyinen ominaisuus verrattuna metalliaitoihin, mikäli meluaitoihin halutaan upottaa esimerkiksi valoja tai muita sähköisiä elementtejä. Keveytensä ansiosta myös komposiittiaidan elementtien kuljetukseen ja pystytykseen vaadittavat kustannukset pienenevät.

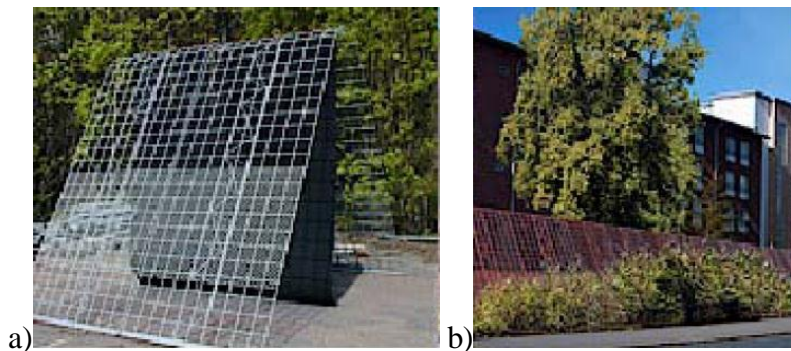
Lujitemuovia voi käyttää myös meluaidan tukipilarien materiaalina. Keller et al. [37] tutkivat Sveitsissä tilannetta, jossa perustuksena olevan betonipaalun päälle pulteilla kiinnitettävä teräspilari voitaisiin korvata betonin sisään upotetulla lasikuitulujitetulla lujitemuovipilarilla (kuva 15). Kyseisellä tukipilarilla on tarkoitus tukea puusta ja teräksestä valmistettuja meluaitaelementtejä. [37]



Kuva 15. Lujitemuovin käyttö meluaidan tukipilarimateriaalina. Perustuksena olevan betonipaalun (drilled pile, foundation) päälle pulteilla kiinnitettävä teräspilari (steel post, vasen kuva) korvataan betonin sisään upotetulla lasikuitulujitetulla lujitemuovipilarilla (GFRP post, oikea kuva). [37]

Tutkijat suorittivat väsymistestejä selvittääkseen komposiittipilarin lujuutta, jäykkyyttä ja väsymisenkestoa. Koejärjestelyssä E-lasikuidulla lujitetusta (noin 50 % tilavuudesta) polyesteristä valmistettiin kolme kappaletta 3 m pitkiä I-palkkeja, jotka upotettiin 500 mm betonin sisään. Betonipalkit olivat 700 mm pitkiä. Komposiittipilareille suoritettiin myös nopeutettu kestävyystesti, jotta voitiin arvioida sen käyttöikä. Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että lujitemuovia voidaan käyttää meluaitojen tukipilareina, sillä lujuusvaatimukset täyttyivät. [37]

Mikäli uusi meluaitaratkaisu on innovatiivinen, kuten kuvassa 16, Liikennevirasto voi antaa SFS-EN –standardista poikkeavan vaatimuksen. Esimerkiksi kuvan 16 aitaan ei sovelleta tuulikuormalla siirtymärajoja. [6]



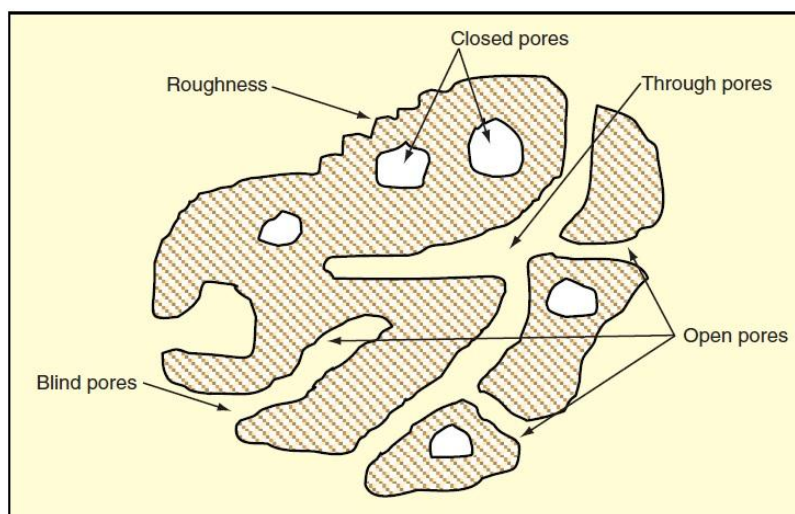
Kuva 16. Teräsverkkohäkistä ja kumimatosta koostuva meluaita. a) Teräshäkin sisällä riippuu pystysuorassa kumimatto, jonka äänen eristävyysluku on vähintään 25 dB, b) sama aitaratkaisu, jonka yhteyteen on istutettu kasvillisuutta. [6]

Teräshäkin sisällä riippuu pystysuorassa kumimatto, jonka äänen eristävyysluku on vähintään 25 dB. Rakenne on kevyt eikä tarvitse erityistä perustusta pehmeässäkin maastossa. Aita sietää myös epätasaisia painumia, jos vältetään suoria pintoja ja linjoja, tai jos häkkiin istutetaan kasvillisuutta, kuten kuvassa 16b. [6]

4.2 Yleiset absorboivat materiaalit

Ääntä absorboivat materiaalit imevät itseensä suurimman osan äänienergiasta, joka törmää niitä päin. Äänen heijastuminen materiaalin pinnasta on hyvin pientä. Tämän vuoksi ne ovat erinomaisia meluntorjunnassa. Nykyään on hyvin laaja valikoima erilaisia ääntä absorboivia materiaaleja, joka täyttävät halutut akustiset ominaisuudet. Lisäksi tarjolla on eri värejä, muotoja, kokoja, valon heijastavuutta, tulta kestäviä materiaaleja. Myös hintahaitari on suuri. [38]

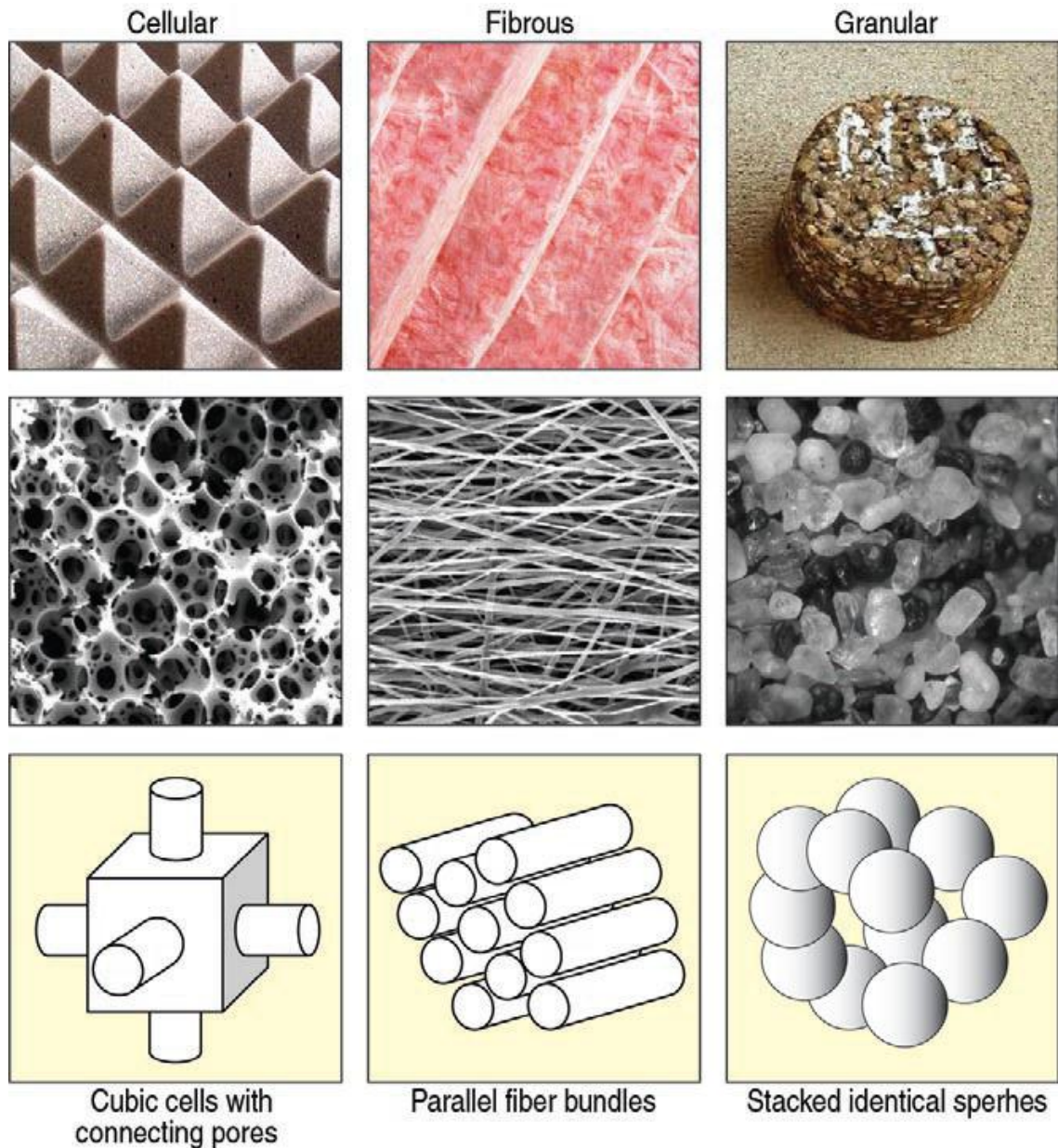
Materiaalit, joilla on erittäin hyvä absorptiokyky, ovat yleensä huokoisia. Huokoinen materiaali on kiinteä aine, joka sisältää paljon reikiä, koloja, onkaloita, rakoja tai tunneleita, joita pitkin ääniaallot voivat edetä. [38, 39] Kuva 17 on poikkileikkaus tällaisen materiaalin mallista.



Kuva 17. Poikkileikkaus absorboivan materiaalin mallista. Suljetut (closed) huokokset ovat kokonaan eristettyinä ”naapureistaan”, avoimilla (open) huokosilla on jatkuva kanavaverkosto, joka on yhteydessä materiaalin ulkopintaan. Avoimet huokokset voivat olla ”sokeita” (blind), jos ne ovat avoimia vain toisesta päästä tai ”läpimeneviä” (through), jos niiden molemmat päät ovat avoimia. Pinnankarheus (roughness) on eri asia kuin huokoisuus. [38]

Huokosia, joka ovat kokonaan eristettyinä ”naapureistaan” sanotaan suljetuiksi huokosiksi. Niillä on vaikutusta joihinkin materiaalin makroskooppisiin ominaisuuksiin kuten tiheyteen, lujuuteen ja lämmönjohtavuuteen, mutta äänen absorptioon niiden vaikutus on vähäinen. Sen sijaan avoimien huokosten vaikutus materiaalin absorptiokykyyn on merkittävä, sillä niillä on jatkuva kanavaverkosto, joka on yhteydessä materiaalin ulkopintaan. Avoimet huokokset voivat olla myös ”sokeita”, jolloin ne ovat avoimia vain toisesta päästä tai ”läpimeneviä”, jolloin niiden molemmat päät ovat avoimia. Käytännöllinen ja yleinen tapa erottaa materiaalin huokoisuus ja karheus on oletus, jonka mukaan karhea pinta ei ole huokoinen, ellei siinä ole epäsäännöllisyyksiä, jotka ovat syvyydeltään suurempia, kuin mitä ne ovat leveydeltään. [38]

Absorboivat materiaalit voidaan luokitella solukkoisiin, kuitumaisiin ja rakeisiin, perustuen niiden mikroskooppiseen rakenteeseen. [38, 40] Kuvassa 18 on nähtävillä nämä kolme pääasiallista absorboivaa materiaalilajia, niille tyypilliset mikroskooppiset rakenteet sekä fysikaaliset mallit, joilla voidaan kuvata niiden absorptiomekanismia.



Kuva 18. Kolme yleistä huokoisen absorboivan materiaalin rakennetta: solukkoinen (cellular), kuitumainen (fibrous) ja rakeinen (granular). Ylimpänä kuvat materiaaleista, keskimmäisenä niiden mikroskooppiset rakenteet ja alimpana fysikaaliset mallit, joiden avulla kuvataan materiaalien absorptiomekanismia. [38]

Kuitumaiset absorboivat materiaalit koostuvat joukosta jatkuvia säikeitä, jotka vangitsevat ilman väliinsä. Niitä voidaan valmistaa rulliksi tai laatoiksi, ja niillä on erilaisia akustisia, mekaanisia ja lämpöominaisuuksia. Suurin osa kaupallisista ääntä absorboivista materiaaleista on kuitumaisia tuotteita. Kuitumaiset materiaalit voidaan luokitella

luonnonkuituihin ja synteettisiin kuituihin. Luonnonkuidut voivat olla peräisin kasveista (puuvilla, hamppu, pellava, puu), eläimistä (villa) tai mineraaleista (asbesti). Synteettiset kuidut voidaan valmistaa selluloosasta (bambukuidut), mineraaleista (lasikuitu, mineraalivilla, lasivilla, grafiitti, keraamiset kuidut) tai polymeereistä (polyesteri, polypropeni, aramidi). Äänen absorbointiin käytetään yleisimmin polymeereistä ja mineraaleista valmistettuja synteettisiä kuitumateriaaleja. Niiden valmistuksen aiheuttama hiilijalanjälki on kuitenkin melko suuri, joten luonnonkuitujen käyttöön absorboivina materiaaleina on alettu kiinnittää enemmän huomiota. Myös luonnonkuitujen kierrätys on helpompaa. [38] Käytännön kohteissa, etenkin ulkoilmassa, käytetyt kuitumaiset ääntä absorboivat materiaalit on suojattu ohuella muovikerroksella, rei'itetyllä paneelilla tai kudotulla kankaalla kosteuden ja epäpuhtauksien imeytymisen estämiseksi. [1, 41]

Yleisimmät käytössä olevat solukkoiset absorboivat materiaalit ovat polyuretaani- ja melamiinivaahoja. Vaativampiin käyttöolosuhteisiin, kuten esimerkiksi korkeisiin lämpötiloihin, soveltuvat metallivaahdot ja keraamivaahdot. Metallivaahoja valmistetaan alumiinista (yleisin), nikkelistä, teräksestä, titaanista ja kuparista. Keraamivaahdot ovat yleensä piipohjaisia, mutta vaahoja voidaan valmistaa myös titaanista, boorista ja zirkoniumista. [38]

Rakeiset absorboivat materiaalit voivat koostua joko yhteen sulautetuista rakeista, tai ne voivat olla irtonaisia toisistaan [42]. Rakeisia materiaaleja ovat eräät asfaltit, huokoinen betoni, rakeinen savi, hiekka, sora sekä multa ja maaperä. [38]

Materiaali- ja kemiantekniikan ja nanoteknologian kehittyessä tarjoutuu akustisten materiaalien rakenteeseen, tuotantoon ja suorituskyykyyn merkittäviä parannuksia. Tällaisia kehityskohteita ovat muun muassa luonnonkuidut, biopohjaiset polymeerit, kierrätetyt materiaalit, huokoiset metallit, uudet komposiitit sekä ”viisaat materiaalit”. [38]

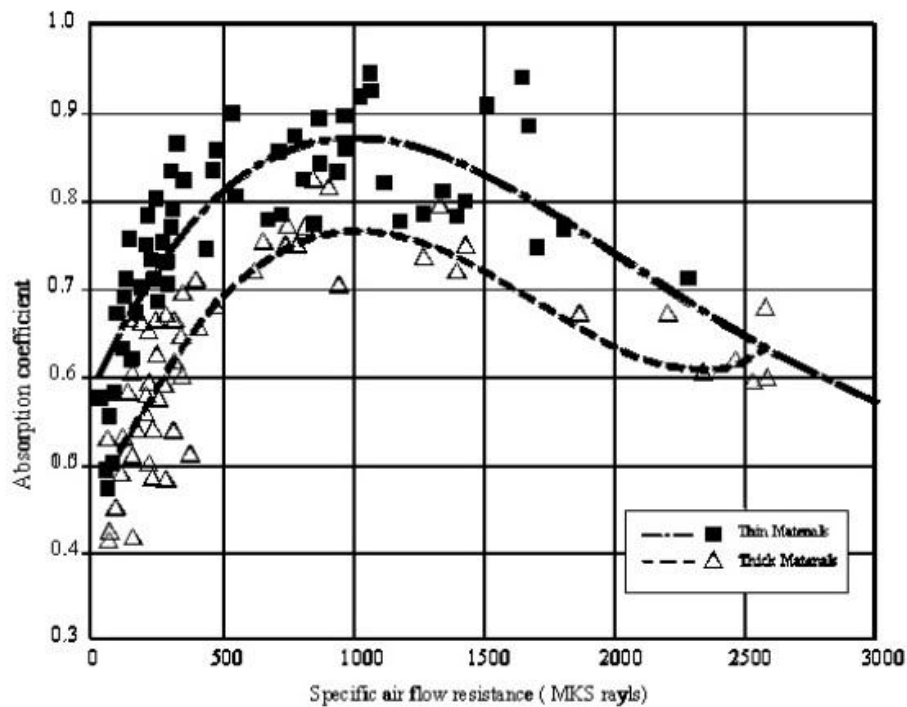
Absorboituessaan huokoiseen materiaaliin äänienergia muuttuu lämmöksi ilman molekyylien ja materiaalin pintojen välisen kitkan seurauksena. Kuitumaisilla materiaaleilla osa energiasta absorboituu myös yksittäisten kuitujen värähtelyn seurauksena, jolloin kuidut hankautuvat toisiaan vasten ja aiheutuu kitkaa. [38, 40, 43]

4.3 Äänen absorptioon vaikuttavat ominaisuudet materiaalissa

Kuten edellisestä luvusta huomataan, ovat ääntä absorboivat materiaalit rakenteeltaan huokoisia ja keveitä. Tässä luvussa tarkastellaan tekijöitä, jotka vaikuttavat äänen absorboitumiseen materiaalissa. Tällaisia parametreja ovat huokoisuuden ja tiheyden lisäksi muun muassa ilman virtausvastus (airflow resistance), mutkittelevuus (tortuosity), materiaalin paksuus sekä villojen osalta kuitupaksuus [43,44]. Kappaleessa 7 pohditaan, miten vastaavat ominaisuudet voisi toteuttaa kierrätetystä lujitemuovijätteestä ja tämän pohjalta valmistetaan näytekappaleita ääniabsorptiotestejä varten. Lähteessä [40] on koottu erilaisia malleja ja laskentakaavoja, joiden avulla voi laskea materiaalin absorptiokykyä tai edellä mainittuja ominaisuuksia.

4.3.1 Ilman virtausvastus (airflow resistance)

Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, jotka vaikuttavat materiaalin äänen absorptiokykyyn, on materiaalille ominainen ilman virtausvastus. Ilman virtausvastus on se vastus, joka syntyy, kun ilmavirta läpäisee materiaalin sen avointen huokosten kautta. Ilman virtausvastuksen yksikkö on $\text{mks} \cdot \text{Rayls/m}$ (eli $\text{Pa} \cdot \text{s/m}$). [38, 41] Hoda S. Seddeq [41] tutki ilman virtausvastuksen vaikutusta materiaalien absorptiokykyyn, tulokset ovat nähtävissä kuvassa 19.



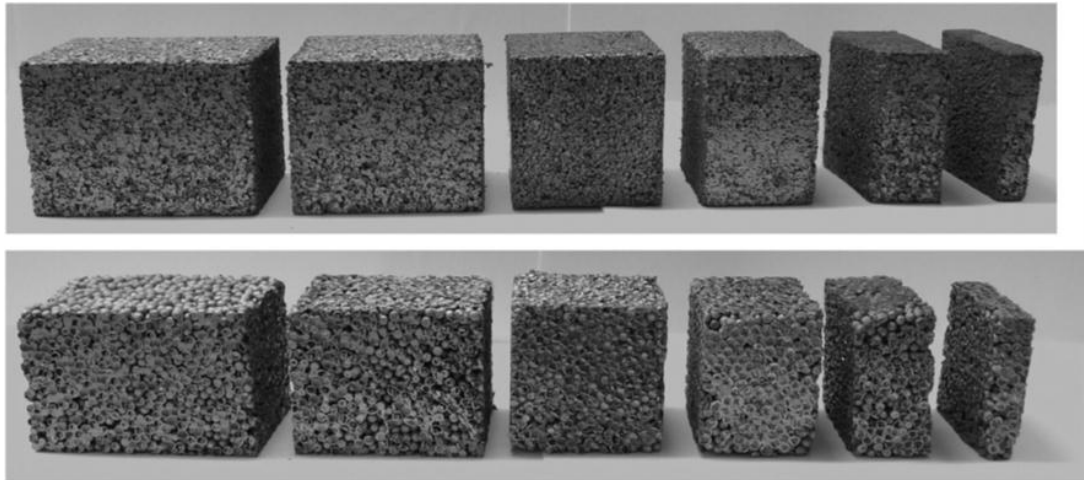
Kuva 19. Materiaalin absorptiokerroin ilman virtausvastuksen funktiona. Ylempi käyrä käsittää ohuet materiaalit ja alempi käyrä paksut materiaalit. [41]

Ilman virtausvastuksen kasvaessa myös absorptiokyky kasvaa, aina ilman virtausvastuksen arvoon 1000 asti. Tämän jälkeen ääniaallon liikkuminen materiaalin läpi vaikeutuu ja absorptiokyky laskee. [41]

4.3.2 Huokoisuus

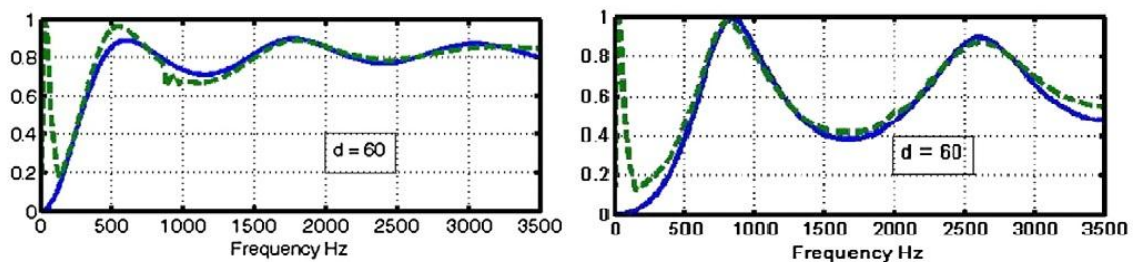
Materiaalin huokoisuus määritellään materiaalin sisällä olevien huokosten (aiheuttaman tyhjän tilan) tilavuuden (void space, V_a) suhteena koko materiaalin tilavuuteen. Huokoisuusprosentti ei yksinään vaikuta materiaalin absorptiokykyyn, vaan myös huokosten muodolla on merkitystä. Kuten luvussa 4.2 tuli esille, suljetuilla huokosilla ei ole suurta merkitystä absorptioon, vaan huokosten tulisi olla avoimia. [38, 39]. Myös huokosten lukumäärällä on vaikutusta, sillä materiaalin pinnassa on oltava riittävästi huokosia, jotta ääniaallot pääsevät materiaaliin sisälle ja vaimentuvat [41].

Mineraali- ja lasivilloilla sekä vaahtomuoveilla huokoisuuden arvo on usein yli 0,95 [39]. Tavallisilla, tiheillä asfalteilla tyhjän tilan osuus V_a on noin 5 % (eli 0,05), kun puolestaan huokoisilla asfalteilla luku on noin 15 – 30 % (0,15 – 0,30) [38]. Pannert et al. [43] huomasivat huokoisuuden vaikutuksen materiaalin absorptiokertoimeen tutkiesaan kuvan 20 mukaisia näytteitä.



Kuva 20. Pannert et al. valmistamat materiaalinäytteet, jotka koostuvat ontoista metallipalloista. Ylemmän kuvan pallot ovat halkaisijaltaan 1,5 mm ja alemman kuvan 2,5 mm. Ylemmän rivin huokoisuuden arvoksi mitattiin 0,6 (laskettu arvo 0,84) ja alemman rivin huokoisuuden arvoksi mitattiin 0,4 (laskettu arvo 0,37). Näytteiden paksuudet vaihtelevat 10 mm:stä 60 mm:iin. [43]

Mittaukset suoritettiin impedanssiputken avulla ja kuvassa 21 on esitettynä molempien materiaalien 60 mm paksulla näytteellä saadut tulokset.



Kuva 21. Kahden erilaisen ontoista metallipalloista valmistetun materiaalin absorptiokerroin taajuuden funktiona. Vasemmalla puolella huokoisempi materiaali, eli kuvan 20 ylemmän rivin materiaali. Katkoviivalla on merkitty mitatut tulokset, jatkuva viiva on Allard-Champoux teorian mukainen. Muokattu lähteestä [43]

Huokoisemmalla näytteellä (raekoko 1,5 mm, huokoisuus 0,6) havaitaan olevan laajempi absorptioalue 500 Hz ylöspäin, absorptiokertoimen vaihdellessa vain vähän. Materiaalin absorptiokerroin ei laske alle 0,7. Toisella näytteellä ensimmäinen absorptioarvon

huippu tapahtuu taajuuden ollessa 800 Hz ja sen jälkeen absorptiokerroin laskee arvoon 0,4 ennen toista huippua. [43]

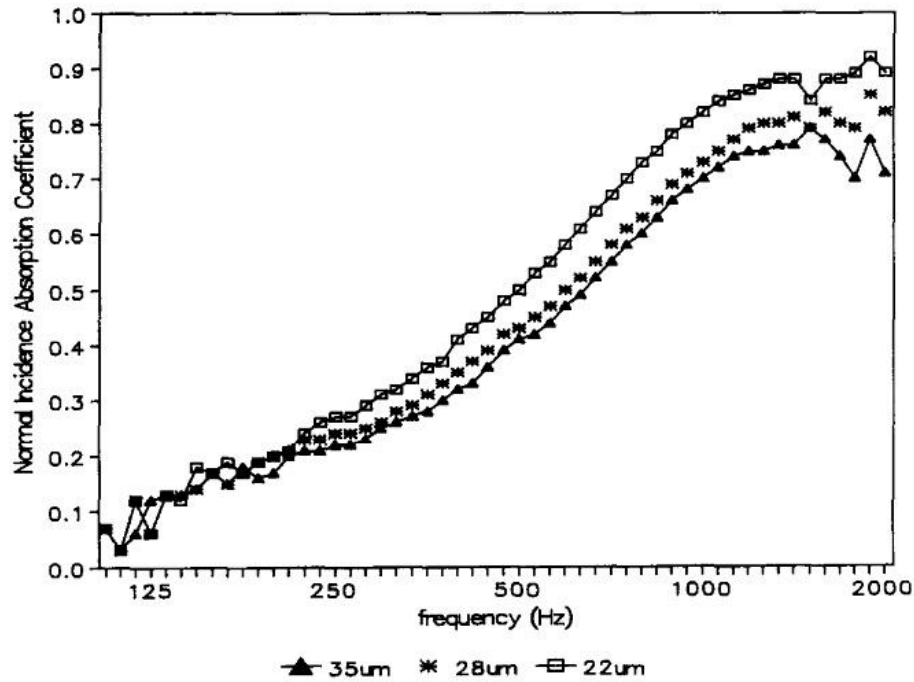
4.3.3 Kuitupaksuus (villat)

Tärkeä parametri, joka vaikuttaa kuitumaisten materiaalien absorptiokykyyn, on kuitupaksuus. Alla olevassa taulukossa on nähtävillä yleisimpien kuitumateriaalien kuitupaksuuksia. Yleisesti luonnonkuitujen paksuudet ovat suurempia kuin synteettisesti valmistettujen. Luonnonkuitujen paksuuden vaihtelu on myös suurempaa kuin synteettisten ja ne ovat muodoltaan epäsäännöllisempiä. [38]

Taulukko 3. Keskimääräisiä kuitupaksuuksia, muokattu lähteestä [38]

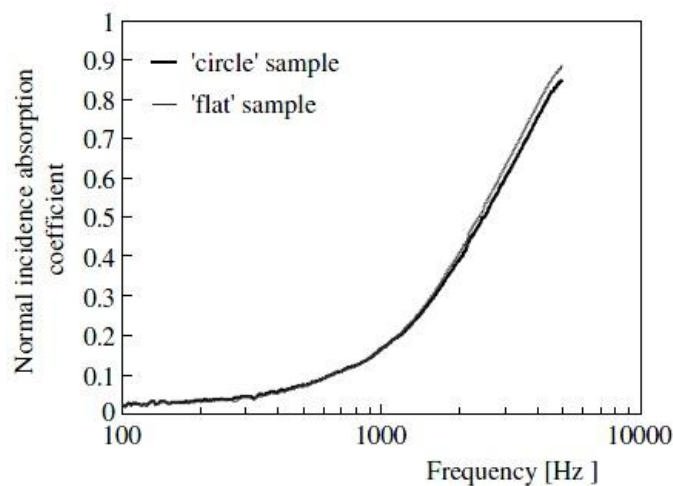
Alkuperä	Kuitumateriaali	Kuidun halkaisija [μm]
Synteettiset	Keraaminen	2 - 6
	Mineraalivilla (kivivilla)	3 - 10
	Lasikuitu (jatkuvakuituinen)	6 - 13
	Lasivilla	3 - 7
	Grafiitti	5 - 10
	Basaltti	7 - 13
	Bambu	14
	Polypropeeni	5 - 25
	Polyesteri	3 - 15
	Kevlar	12
Luonnonkuidut	Puuvilla	8 - 33
	Kenaf	21
	Hamppu	22
	Puu	16 - 38
	Pellava	19
	Sokeriruoko	20
	Juutti	20

Kuiduista valmistetun materiaalin absorptiokyky paranee kuitujen halkaisijan pienentyessä [41]. Myös K. O. Ballagh [44] havaitsi tämän tutkiessaan lampaan villasta valmistettuja (yhtä paksuja) näytteitä. Näytteet oli valmistettu kolmesta eri kuitupaksuudesta [44]. Kuvassa 22 on esitetty tulokset.



Kuva 22. Lampaan villasta kuitupaksuuksilla 22 μm , 28 μm ja 35 μm valmistettujen materiaalien absorptiokerroin taajuuden funktiona [44]

Kuitujen poikkileikkauspinnan muodolla sen sijaan ei ole merkittävää vaikutusta materiaalin absorptiokykyyn, kuten on havaittavissa kuvassa 23. [45]



Kuva 23. Pyöreistä (circle) ja litteistä (flat) kuiduista valmistettujen materiaalien absorptiokerroin taajuuden funktiona [45]

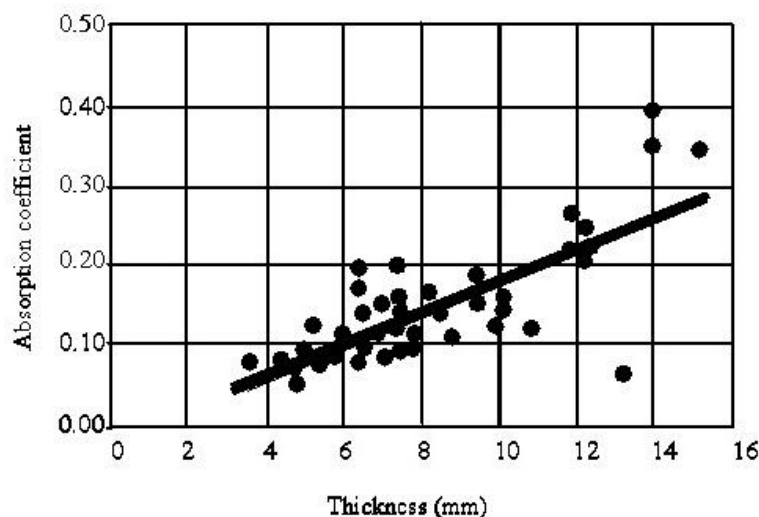
Kino ja Ueno [45] mittasivat kuidun poikkileikkauspinnan vaikutusta materiaalin absorptiokykyyn. Mittaukset suoritettiin pyöreistä, litteistä, ontoista sekä kolmionmallisista kuiduista valmistetuille polyesterimateriaaleille. Kaikkien näytteiden paksuus oli 11 mm ja näytteiden tiheydet melko samanlaisia. Merkittäviä eroja absorptiotuloksissa ei havaittu. [45]

4.3.4 Tiheys

Materiaalin tiheyden vaikutus äänen absorptiokykyyn ei ole niin yksiselitteinen kuin muiden mainittujen ominaisuuksien. Koizumi et al. [46, katso 41] osoittivat tutkimuksessaan, että äänen absorptio paranee keski- ja korkeilla taajuuksilla, kun materiaalin tiheys kasvaa. Kuitumaisilla materiaaleilla tämä johtuu kuitujen määrän kasvusta pinta-alayksikköä kohden, jolloin pintojen välinen kitka kasvaa ja tämän myötä myös energiahäviö on suurempi, eli ääni absorboituu paremmin. Nonwoven -materiaaleilla havaittiin avoimemman ja vähemmän tiheän rakenteen absorboivan ääntä paremmin matalilla taajuuksilla (500 Hz), kun taas korkeiden taajuuksien (yli 2000 Hz) absorptioon sopii tiheämpi rakenne. [41]

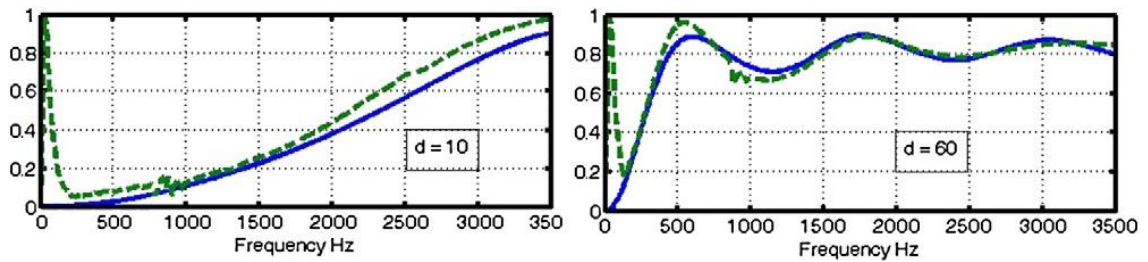
4.3.5 Paksuus

Materiaalin paksuudella on suora yhteys matalien taajuuksien absorptiokykyyn. Mitä paksumpi materiaali, sitä paremmin se absorboi ääntä, kuten on havaittavissa Hoda S. Seddegin tekemien mittausten tuloksista, kuva 24. [41]



Kuva 24. Materiaalin absorptiokyky materiaalin paksuuden funktiona [41]

Pannert et al. [43] tutkivat myös materiaalin paksuuden vaikutusta absorptiokykyyn. He valmistsivat luvussa 4.3.2. olevan kuvan 20 mukaisia näytteitä ja mittasivat niiden absorptiokertoimet käyttäen impedanssiputkea. Kuvasta 25 havaitaan, että paksumpi materiaali saavuttaa ensimmäisen absorptiokertoimen huipun huomattavasti alhaisemmalla taajuudella, eli absorboi ääntä suuremmalla taajuusalueella. Mitattu materiaali on kuvan 20 ylemmällä rivillä olevaa materiaalia, eli rakeet ovat halkaisijaltaan 1,5 mm ja materiaalin huokoisuus on 0,6. [43]



Kuva 25. 10 mm ja 60 mm paksujen materiaalinäytteiden absorptiokerroin taajuuden funktiona. Katkoviivalla on merkitty mitatut tulokset, jatkuva viiva on Allard-Champoux teorian mukainen. Muokattu lähteestä [43]

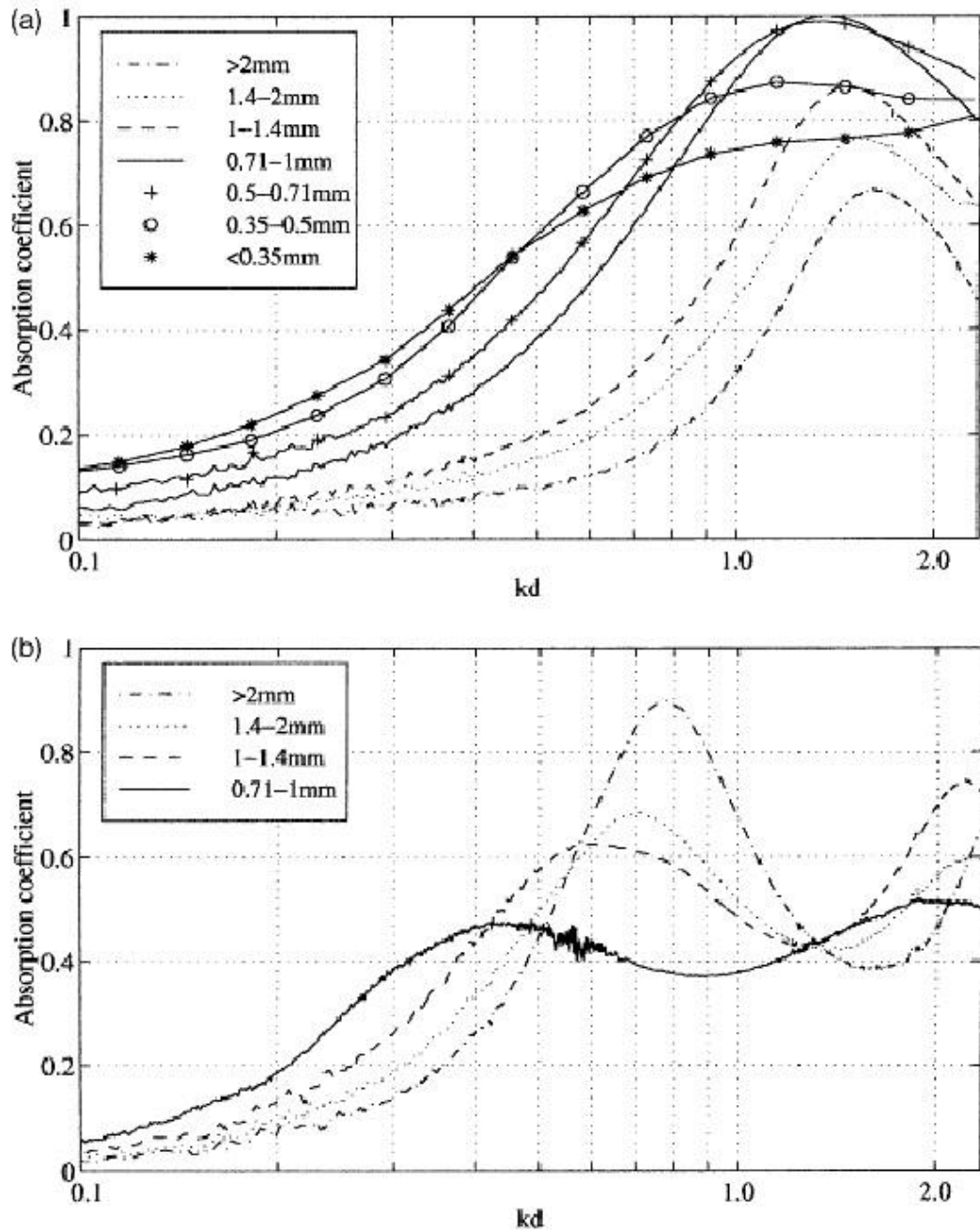
Materiaalin paksuus vaikuttaa etenkin matalien taajuuksien absorbointiin. Tämä perustuu fysiikkaan, matalilla taajuuksilla on pitempi aallonpituus, joten se tarvitsee pidemmän matkan vaimentuakseen. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että tehokas äänen absorptio saavutetaan, kun materiaalin paksuus on noin 1/10 äänen aallonpituudesta. Korkeilla taajuuksilla materiaalin paksuudesta ei ole hyötyä absorption parannukseen. [41] Edellä kuvatun nyrkkisäännön mukaisesti esimerkiksi taajuudella 200 Hz värähtelevän äänen (aallonpituus 1,72 m) vaimentamiseen tarvittaisiin 17,2 cm paksu huokoinen materiaali.

4.3.6 Mutkittelevuus (tortuosity)

Mutkittelevuus tarkoittaa materiaalin sisällä olevien avointen huokosten muodostaman kulkureitin muotoa. Eli onko tunnelin, jota pitkin ilma pyrkii eteenpäin materiaalissa, muoto melkein suora vaiko kiemurteleva ja mutkikas ja onko kulkureitin poikkipinta-ala nopeasti vai hitaasti muuttuva. [38, 43] Tätä mutkittelevuutta verrataan materiaalin paksuuteen. Materiaalin mutkittelevuuden sanotaan vaikuttavan etenkin materiaalin käyttäytymiseen korkeilla äänentaajuuksilla. [41]

4.3.7 Raekoko (rakeinen materiaali)

Swift et al. [42] tutkivat kierrätetystä kumista valmistettuja rakeisia absorboivia materiaaleja. Osa materiaaleista oli sulautettu yhteen sideaineen avulla, osa materiaaleista koostui irtonaisista rakeista. Kuvassa 26 on nähtävissä partikkelikoon vaikutus absorptiokykyyn molemmissa materiaaleissa.



Kuva 26. Raekoon vaikutus absorptiokykyyn. a) irtonaiset partikkelit, b) yhteen liitetyt partikkelit. [42]

Mittauksissa käytetyn kierrätetyistä autonrenkaista valmistetun kumirakeen tiheys on 1050 kg/m^3 . Rakeet ovat muodoltaan hyvin epäsäännöllisiä ja niiden koko vaihtelee välillä $0,35 - 5,0 \text{ mm}$. Yhteen liitettyjen partikkelien sideaineena on käytetty polymeeri-pohjaista adhesiivia. Irtonaisessa rakenteessa pienemmistä partikkeleista valmistetut materiaalit absorboivat ääntä paremmin, sillä suuremmista partikkeleista valmistetuilla materiaaleilla ilman virtausvastus on pienempi. Sulautetussa rakenteessa partikkelikoolle on merkitystä lähinnä matalilla taajuuksilla. Myös tällöin pienemmistä partikkeleista valmistetut materiaalit absorboivat ääntä paremmin. [42]

Kumipartikkeleista valmistettuja materiaaleja ovat tutkineet myös Sobral et al. [47] Heikin päätyivät tulokseen, että pienemmistä partikkeleista (raekoko 0,5 – 1,5 mm) valmistettu materiaali absorboi ääntä paremmin kuin suuremmista partikkeleista (raekoko 2,0 – 3,0 mm) valmistettu materiaali.

4.4 Olemassa olevat ääntä absorboivat meluaidat sekä komposiittiaidat

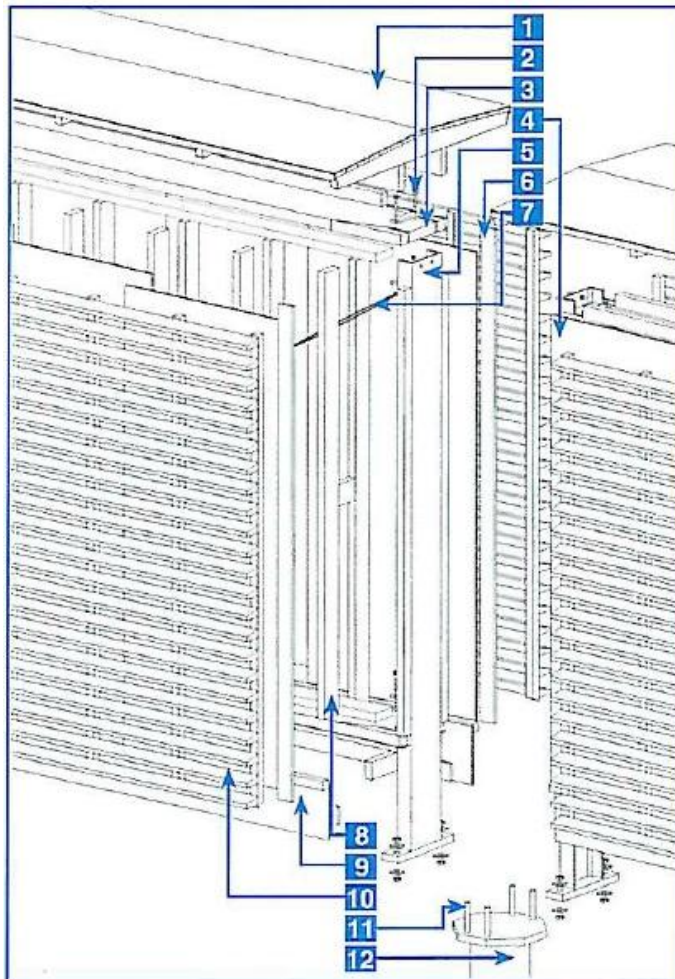
Yleisin ääntä absorboiva rakenne meluaidassa on puu-, metalli- tai muoviritilällä, reikälevyllä tai verkolla suojattu kuitumainen absorptiomateriaali. Tällaisella rakenteella saavutetaan yleensä absorptioluokka A3 tai A4, kun ritilän tai rei'ityksen osuus etulevyn pinta-alasta on oikea. [6]

Ruukin valmistama ääntä absorboiva meluaita koostuu absorboivasta meluestekasetista, joka asennetaan teräsprofiilista valmistettujen palkkien väliin, joiden perustana on teräsputkipaalu. Aitaan voidaan liittää myös ulkonäköä parantavia lisäosia, kuten verkkoja ja rimoja. Absorboivan kasetin rakenne on nähtävillä alla olevassa kuvassa. Pinnoitetut teräsohutlevyt ovat 1,2 mm paksuja, joista tien puoleinen levy on rei'itetty. Rei'itysaste on 30 % ja reikien koko 4 mm. Absorboivana sisämateriaalina on 90 mm paksu polyesterivilla, jonka tiheys on 15kg/m³. Kasetin ilmaääneneristävyyden luokka on B3 ja absorptioluokka A3. [33]



Kuva 27. Ruukin ääntä absorboivan meluestekasetin rakenne. Kasetti muodostuu pinnoitetuista teräsohutlevyistä, joista tien puoleinen levy on rei'itetty. Absorboivana sisämateriaalina on polyesterivillaa. [33]

Eridomic Oy:n valmistama absorboiva meluaita on valmistettu puusta. Itsekantavat, jänneväliltään jopa 12-metriset meluseinäelementit asennetaan suoraan perustusten päälle. Elementin kantavat palkit tukeutuvat elementin päissä oleviin teräspilareihin, jotka jäävät piiloon elementin sisälle. Meluseinän runko, joka koostuu koolauksesta, verhoillaan molemmin puolin samanlaisilla levyillä. Kun aidasta halutaan absorboiva, asennetaan tien puolelle absorboiva monilevyrakente, joka hyödyntää rungon sisään jäävän välitilan. Havainnekuva aidan rakenteesta kuvassa 28. Elementin ilmaääneneristävyyden luokka on B3 ja absorptioluokka A3. [27]



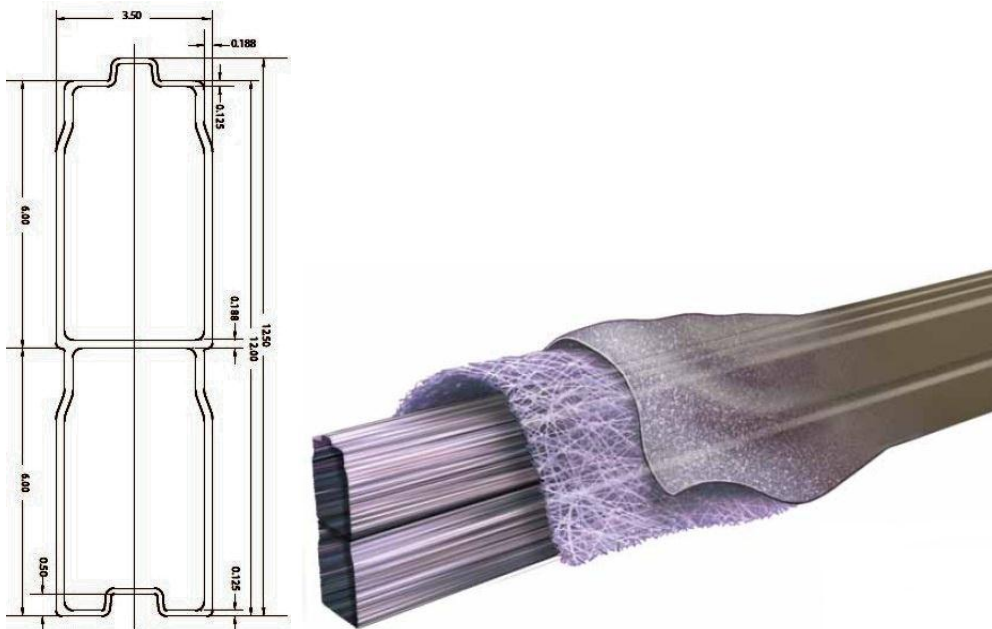
Kuva 28. Eridomic Oy:n ääntä absorboivan meluesteen rakenne. 1) kate-elementti, 2) kiinnitysosa, 3) palkki, 4) pintalevytys, 5) teräspilari, 6) vuorilauta, 7) vetotanko, 8) koolaus, 9) kumimattosokkeli, 10) verhouselementti, 11) peruspultit, 12) teräsputkipaalu tai teräsbetoniantura [27]

Glan Oy valmistaa absorboivia meluaitoja materiaalista, jonka kertoo olevan vinyyliä. Rakenteen ratkaisu on vastaava kuin Ruukin aidassa, sisämateriaalina ääntä imevä materiaali ja päällä rei'itetty levy. Absorboivana materiaalina Glan Oy käyttää kivivillaa. Elementin rakenne alla. [48]



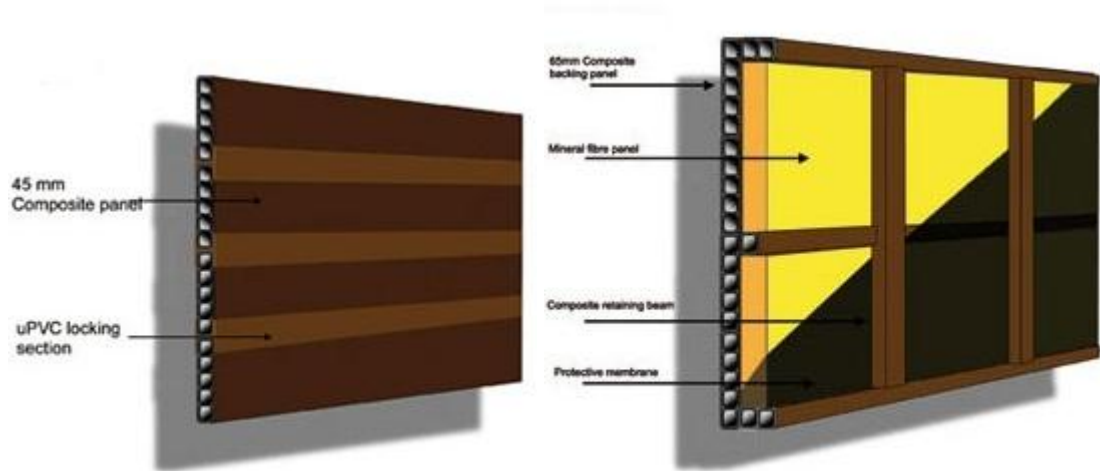
Kuva 29. Glan Oy:n valmistaman absorboivan meluidan rakenne. Kasetti on Glan Oy:n kotisivujen mukaan vinyyliä, sisämateriaali kivivillaa. [48]

USA:ssa toimiva Fibergrate Composite Structures Inc. valmistaa ääntä heijastavia meluaitoja lasikuitulujitetusta polyesteristä pultruusiolla. Lasikuidun osuus on 45 – 55 paino-%. Kuvan 30 mukaisista toisiinsa päällekkäin limittyvistä palkeista kootaan seinäelementti. Aidan paksuus on 8,89 cm (3,5 tuumaa). [36]



Kuva 30. Fibergrate Composite Structures:in valmistaman heijastavan komposiittiaidan pinottavien palkkien rakennekuva [36]

Iso-Britanniassa toimiva Tilon Composites valmistaa komposiiteista sekä heijastavia että absorboivia meluaitoja. Kuvassa 31 on molempien aitavaihtoehtojen rakennekuvat. Ääntä heijastava aita koostuu haluttuun korkeuteen käyttäen vuorotellen lujitemuovi-paneeleita ja lukitsevia osia. Paneelit ovat lasikuitulujitettua polypropeenaa, joissa on UV-stabiloitu HDPE-pinnoitus. Lukitsevat osat ovat uPVC-profiilia. Absorboivan meluaidan tukirakenteet ovat lasikuitulujitettua polypropeenaa, jossa on UV-stabiloitu HDPE-pinta. Ääntä absorboivat levyt ovat mineraalivillaa, ja niitä suojaa HDPE-kalvo. [49]



Kuva 31. Tilon Composites:in valmistamien meluaitojen rakennekuvat, vasemmalla heijastava aita, oikealla absorboiva. Heijastava aita koostuu käyttäen vuorotellen lasikuitulujitettuja polypropeenipaneeleja sekä PVC-profiilista valmistettuja lukitsevia osia. Absorboivan elementin tukirakenteet ovat lasikuitulujitettua polypropeenaa ja absorboivana aineena on mineraalivillaa, jota suojaa HDPE-kalvo. [49]

Kiinassa Henan Huarun Environmental Engineering Co., Ltd valmistaa lasikuitulujitettuja absorboivia meluaitoja (kuva 32). Yhtiö ilmoittaa aidan absorptiokertoimeksi yli 0,80. Kuten kuvasta havaitaan, myös tässä aidassa näyttäisi olevan absorptiorakenteena rei'itetyn levyn sisällä oleva absorboiva materiaali. [50]



Kuva 32. Henan Huarun Environmental Engineering Co. Ltd:n valmistama absorboiva meluaita [50]

Kaikissa edellä esitellyissä absorboivissa meluaidoissa on absorboivana materiaalina kuitumainen materiaali, joka on rei'itetyn etulevyn takana. Rei'itysosuuden on oltava oikea, jotta aitaan saataisiin mahdollisimman hyvät absorptio-ominaisuudet [6]. Etulevy asettaa siis rajat absorptio-ominaisuuksille, paitsi jos aukkojen pinta-ala ylittää noin 30 % kokonaispinta-alasta. [39]

Rei'itetyt levyt ovat erittäin hyödyllisiä, kun ollaan tekemisissä matalien taajuuksien kanssa. [51] Rei'itetyn levyn absorptio-ominaisuudet riippuvat monesta eri tekijästä, kuten reikien halkaisijasta, lukumäärästä ja niiden keskinäisestä etäisyydestä sekä myös reikien sisällä olevan viskoosin rajapinnan paksuudesta ja akustisesta resistanssista. [51, 52] Lähteissä [51, 52] on malleja ja kaavoja, joiden avulla voi optimoida parhaat parametrien arvot kulloiseenkin käyttötärpeeseen.

5 MELUIDAN AKUSTISET MITTAUSMENETELMÄT JA SIMULOINNIT

Jotta meluaitaa voisi markkinoida ääntä absorboivana, on sen ääntä imevä vaikutus oltava todistettavissa. Tätä varten mitataan meluidan absorptiokyky. Mitataan myös ilmään eristävyys. Mittauksia varten on olemassa standardit, jotta eri meluaitojen akustisia ominaisuuksia voi verrata keskenään. [6]

5.1 Meluaitastandardit

Meluidan äänen absorptiokykyä mitataan standardin SFS-EN 1793-1 mukaisesti ja ilmään eristävyttä standardin SFS-EN 1793-2 mukaisesti. Molemmat testit suoritetaan kaiuntahuoneessa noudattaen standardissa SFS-EN 1793-3 määriteltyä standardisoitua liikennemelun spektriä, eli terssikaistoittain käyttäen keskitaajuuksina 100 – 5000 Hz. Tämä tarkoittaa sitä, että mittaukset suoritetaan taajuuksilla 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 ja 5000 Hz. [20, 21, 53] Standardien mukaisia akustiikkatestejä suorittaa VTT [54].

5.1.1 Äänen absorptio, SFS-EN 1793-1

Eurooppalainen standardi SFS-EN 1793-1 (Teiden meluesteet. Akustisten ominaisuuksien määrittäminen. Osa 1: Tuotekohtainen äänen absorptio.) määrittelee menetelmän, jolla mitataan laboratoriossa tasapintaisten meluesteiden tai tasapintaisten tukimuuri- tai tunnelipinnoitteiden äänen absorptio. Se sisältää tuotteen rakenteesta riippuvan äänen absorptiokyvyn arvioinnin niiden tienvarsien meluntorjuntavaruusteiden osalta, jotka voidaan asentaa EN 20354 (nykyään EN ISO 354) mukaiseen testauspaikkaan. Testijärjestelyt ovat samat kuin edellä mainitussa standardissa EN ISO 354, mutta vaatimukset testikappaleen osalta on esitetty standardissa SFS-EN 1793-1. Testattavan meluidan on oltava sellainen kuin se tulee olemaan käytössäkin, sisältäen liitokset, tiivisteet, tolpat ja tuet ynnä muut. Näin saadaan mitattua ja luokiteltua (katso luku 2.3.1) käyttöön tulevan meluidan absorptiokyky. Mikäli testataan vain seinäelementin absorptio, ilman tukipilareita ym., on se mainittava meluidan akustisissa tiedoissa. [6, 21]

Mittaus tapahtuu standardin EN ISO 354 (Akustiikka. Ääniabsorption mittaaminen kaiuntahuoneessa) mukaisesti määritellyssä kaiuntahuoneessa standardin määräämillä testaustavoilla. Kaiuntahuoneen on oltava tilavuudeltaan vähintään 150 m³, uusien kaiuntahuoneiden osalta mielellään vähintään 200 m³. Standardissa on annettu ohjeita huoneen mitoitukselle. Huoneeseen tuotetaan diffuusi äänikenttä, jonka tuottama kaiunta-aika (aika sekunneissa, jonka aikana äänenpainetaso laskee 60 dB äänen tuottamisen

loputtua) mitataan ensin tyhjällä huoneella ja tämän jälkeen testattavan kappaleen ollessa asennettuna. Näiden kaiunta-aikojen avulla määritetään kappaleen absorptiokyky käyttäen standardin mukaisia yhtälöitä ja tietoja. [55]

5.1.2 Ilmaäänien eristävyys, SFS-EN 1793-2

Eurooppalainen standardi SFS-EN 1793-2 (Teiden meluesteet. Akustisten ominaisuuksien määrittäminen. Osa 2: Tuotekohtainen ilmaäänien eristävyys.) määrittelee menetelmän, jolla mitataan laboratoriossa tienvarsien meluesteiden ilmaäänien eristävyys. Se sisältää tuotteen rakenteesta riippuvan tehokkuuden arvioinnin niiden meluesteiden osalta, jotka voidaan käytännöllisellä tavalla asentaa EN ISO 140-3 mukaiseen testauspaikkaan. Vaatimukset testikappaleelle ovat samat kuin edellisessäkin standardissa, eli testattavan meluaidan on oltava sellainen kuin lopputuote tulee olemaan. Testimethodi on määritetty standardissa EN ISO 140-3. [20]

Standardi EN ISO 140-3 on nykyään EN ISO 10140-1, -2, -3, -4 ja -5: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements. -Part 1: Application rules for specific products. -Part 2: Measurement of airborne sound insulation. -Part 3: Measurement of impact sound insulation. -Part 4: Measurement procedures and requirements. -Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Osassa 5 määritellään vaatimukset laboratoriolle, osassa 4 määritellään testitapa ja osassa 2 kerrotaan kaavat ilmaäänien eristyksen laskemiseen. Mittaukset tapahtuvat kahden vierekkäisen kaiuntahuoneen avulla, joiden väliseen aukkoon testikappale asennetaan tiiviisti. Molempien huoneiden tilavuuden on oltava vähintään 50 m³, mutta niiden tilavuuksien on erottava toisistaan vähintään 10 %. Huoneiden välisen aukon on oltava esimerkiksi seinien ilmaäänien eristävyttä mitattaessa noin 10 m². Toiseen huoneeseen tuotetaan diffuusi äänikenttä tietyllä äänenpainetasolla ja tarkastellaan testikappaleen läpi toiseen huoneeseen tulevaa ääntä. Kappaleen ilmaäänien eristävyden laskemiseksi on muutamia erilaisia metodeja. [56, 57, 58]

5.2 Laskentamallit

Meluesteiden suunnittelussa käytetään melun laskentamalleja, jotta este voidaan mitoitaa akustisesti. Laskentamallin avulla arvioidaan muun muassa esteen pituus, korkeus ja sijainti, joilla saavutetaan mahdollisimman hyvä melun vaimentuminen tarkasteltavassa kohteessa. Laskentamallin käyttäminen esteen suunnittelussa vaatii tarkkoja tietoja väylän geometriasta sekä maastosta väylän ympärillä. Kaupallisista melunlaskentaohjelmista on lisätietoja Melutta -hankkeen loppuraportissa ja ympäristömeludirektiivin täytäntöönpanoon liittyvässä mallivertailussa. [6]

6 ABSORPTIOSUHTEN MÄÄRITYS KOKEELLISESTI

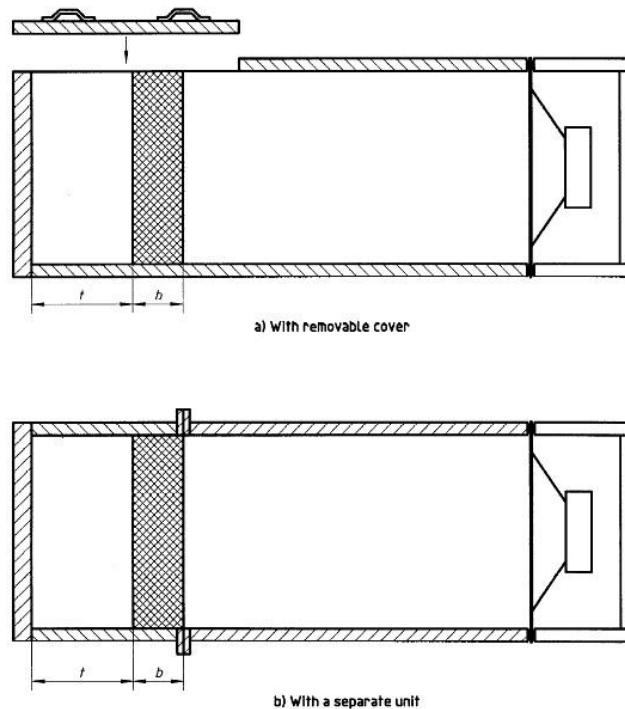
Koska edelliset standardit ja testausmenetelmät soveltuvat valmiille meluaidoille tai muuten hyvin suurille materiaalikappaleille, on paras tapa uusien materiaalien testaukseen alla esiteltävät standardit, joihin vaaditaan vain pieni testikappale. On kuitenkin huomioitava, että alla esiteltävien standardien mukaisissa menetelmissä mittaukset tapahtuvat vain kohtisuoralla äänikentällä, todellisuudessa äänikenttä meluidan tapauksessa on diffuusi. Näin ollen impedanssiputkella saatavat tulokset soveltuvat parhaiten eri materiaalien keskinäiseen vertailuun. Impedanssiputkella mitatut tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia kaiuntahuoneessa mitattuihin tuloksiin. [21, 59]

6.1 Standarditestausten menetelmän esittely

Impedanssiputkella suoritettavia materiaalin äänen absorptiosuhteen ja impedanssin määrittäytapoja on kaksi erilaista, seisovan ääniaallon suhdetta käyttävä menetelmä (SFS-EN ISO 10534-1) sekä siirtofunktiomenetelmä (SFS-EN ISO 10534-2). Molemmat testaustavat suoritetaan impedanssiputkella, mutta testijärjestelyt ja tulosten laskutapa poikkeavat toisistaan. [59, 60]

Impedanssiputki on suora ja poikkileikkaukseltaan vakio, vain 0,2 % poikkeamat poikkileikkauksessa ovat sallittuja. Putken seinämien on oltava jäykät ja sileät, niissä ei saa olla huokoisia, reikiä eikä viiltoja. Putken seinämien on oltava tiheät sekä riittävän paksut, useimmiten materiaalina käytetään metallia, ison poikkileikkauksen putkessa voidaan käyttää myös tiheää ja sileää betonia, mutta se on tiivistettävä huolellisesti. Putki ei saa värähdellä äänisignaalista. Metalliseinien paksuuden on oltava 5 % pyöreästä halkaisijasta ja 10 % suorakaiteesta (mikäli putki on muodoltaan suorakaide, suositellaan käytettäväksi neliön mallista poikkileikkausta). Useimmiten putket ovat kuitenkin poikkileikkaukseltaan ympyröitä. [59, 60]

Putken toisessa päässä on näytteenpidike. Se voi olla joko integroituna putkeen tai erillinen yksikkö, joka kiinnitetään tiukasti putkeen. Myös integroidun näytteenpidikkeen kansi on kiinnitettävä tiiviisti mittausten ajaksi. Kuvassa 33 on kuvattuna molemmat vaihtoehdot. [59]



Kuva 33. Impedanssiputken näytteenpidikkeet. Ylempänä putkeen integroitu pidike, alempana erillinen osa, joka kiinnitetään tiukasti putkeen. [59]

Näytteenpidikkeen syvyyden on oltava riittävän pitkä, jotta näytekappaleen ja näytteenpidikkeen takareunan väliin voi tarvittaessa jättää ilmaraon. Näytteenpidikkeen takalevyn on oltava jäykkä ja tiheä niin kuin putken seinämienkin, metallin olisi hyvä olla vähintään 2 cm paksu. Näytekappaleen on istuttava paikalleen tiiviisti, ei kuitenkaan sitä puristamalla muotoonsa, sillä tällöin näytteen rakenne saattaa muuttua. Näytteen ja putken seinämien tulisi olla tiiviisti kosketuksissa, ilman rakoja. Näytekappaleen liian suuri halkaisija putkeen nähden aiheuttaa resonanssia, jolloin absorptiokäyrässä esiintyy pudotus ja liian pieni halkaisija puolestaan voi aiheuttaa äänen vuotamista sivuja pitkin [61]. Näytteen on oltava suorassa, ohuiden näytekappaleiden paikallaan pysymisen voi varmistaa kiinnittämällä ne kaksipuoleisella teipillä näytteenpidikkeen takalevyyn. [59, 60]

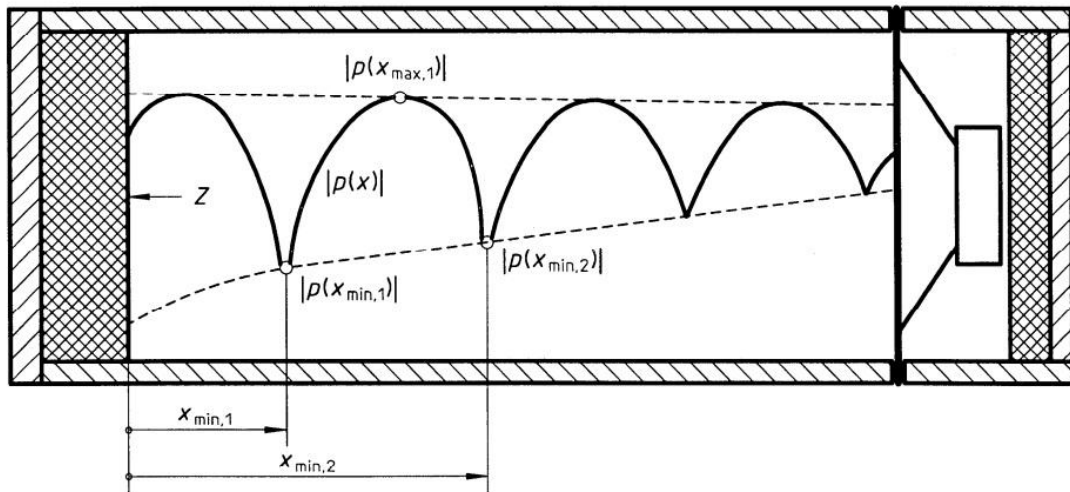
Putken toisessa päässä on kaiutin, joka on yhdistetty signaaligeneraattoriin, jolla luodaan äänisignaali putkeen eri taajuuksilla. Eroavaisuudet testausmenetelmissä syntyvät mikrofoniin sijainnista. Sovelletaan siis sitä standardia, millainen mittauslaitteisto on käytettävissä. [59, 60]

6.1.1 SFS-EN ISO 10534-1

Standardi SFS-EN ISO 10534-1 (Akustiikka. Äänen absorptiosuhteen ja impedanssin määrittäminen impedanssiputkilla. Osa 1: Seisovan aallon suhdetta käyttävä menetelmä) määrittelee testitavan sekä vaatimukset testauslaitteistolle sekä esittää tarvittavat kaavat tulosten laskemiselle. Standardin mukaan suoritetuilla testeillä on mahdollista määrittää

materiaalin absorptiosuhde ja impedanssi äänikentän ollessa kohtisuorassa materiaalia vastaan. [59]

Impedanssiputkella suoritettavassa standardin ISO 10534-1 mukaisessa mittauksessa testikappale asetetaan paikoilleen impedanssiputken toiseen päähän ja ääniaalto tuotetaan putken toisessa päässä olevan signaaligeneraattorin avulla. Seisova aalto muodostuu putkeen kaiuttimesta lähtevän ääniaallon ja materiaalista heijastuneen ääniaallon superpositiona. Materiaalin absorptiosuhteen määrittämiseksi täytyy seisovasta aallosta määrittää kuvan 34 mukaisesti äänenpaineen minimi p_{\min} ja maksimi p_{\max} . [59]



Kuva 34. Äänenpaineen minimin ja maksimin muodostuminen impedanssiputkessa. Testikappale asetetaan impedanssiputken toiseen päähän ja ääniaalto tuotetaan putken toisessa päässä olevan signaaligeneraattorin avulla. Seisova aalto muodostuu putkeen kaiuttimesta lähtevän ääniaallon ja materiaalista heijastuneen ääniaallon superpositiona. [59]

Tämän standardin mukaisessa mittauslaitteistossa on putken sisällä liikuteltava mikrofoni, jonka avulla etsitään äänenpaineen minimi- ja maksimikohdat. Yleisesti mittauksissa käytetään ensimmäistä äänenpaineen minimiä ja äänenpaineen maksimiksi valitaan kahden ensimmäisen minimin välinen äänenpaineen maksimikohta, aivan kuten yllä olevassa kuvassa. Kun minimi ja maksimi on määritetty, voidaan laskea materiaalin absorptiosuhde α seuraavien yhtälöiden (2), (3) ja (4) avulla:

$$s = \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} \quad (2)$$

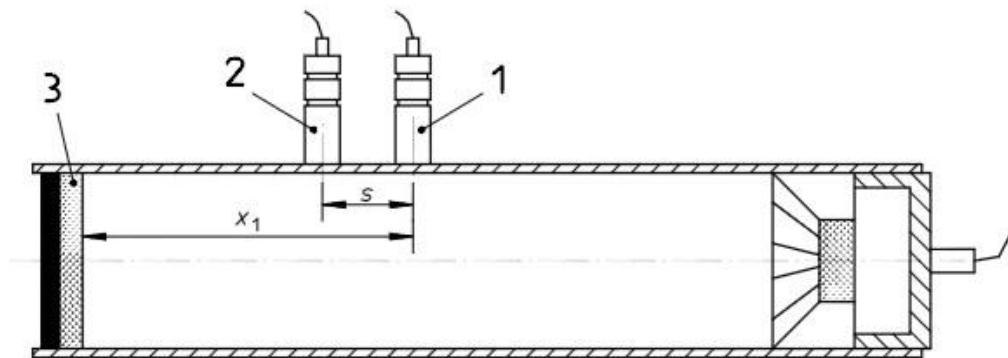
$$|r| = \frac{s-1}{s+1} \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (4)$$

Kun kaikki tarkasteltavat taajuudet on mitattu, saadaan tuloksena materiaalin absorptiokerroin taajuuden funktiona. Absorptiokerroin saa arvoja välillä 0 - 1, suurempien arvojen tarkoittaessa ääntä absorboivaa materiaalia. [59] Ideaalitapauksessa saatu mittauskäyrä olisi suora lähellä arvoa 1, eli materiaali olisi kaikilla taajuuksilla ääntä absorboivaa, riippumatta kappaleessa neljä mainituista äänen absorptioon vaikuttavista materiaaliominaisuuksista.

6.1.2 SFS-EN ISO 10534-2

Myös tällä standardilla voidaan määrittää materiaalin äänen absorptiokerroin. Vastavasti kuin edellisessäkin standardissa, näyte asetetaan näytteenpidikkeeseen ja putkeen luodaan signaaligeneraattorin avulla eri taajuuksilla olevia äänisignaaleita. Tällä kertaa mikrofoneja on kaksi, ja ne on asetettu paikoilleen putkeen, kuva alla. [60]

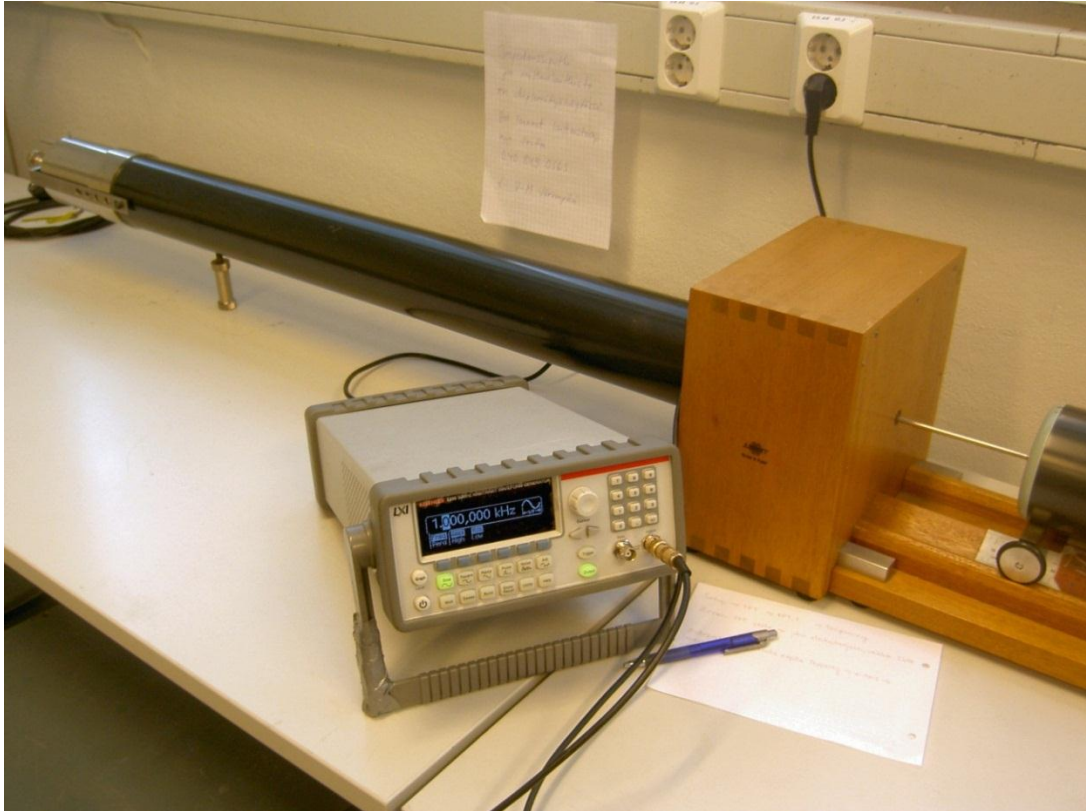


Kuva 35. EN ISO 10534-2 mukainen testilaitteisto [60]

Vertailutasoksi määritetään yleisesti näytekappaleen pinta, määritetään myös molempien mikrofoniin paikat putkessa. Äänenpaineet mitataan juuri mikrofoniin kohdalta, ja tämän jälkeen lasketaan absorptiokerroin siirtofunktiomenetelmän avulla. Tämä mittaus tapa on nopeammin suoritettava vaihtoehto edelliselle tavalle. [60]

6.2 Työssä käytettävä testilaitteisto

Tampereen teknillisen yliopiston impedanssiputki on Brüel & Kjærin valmistama impedanssiputki, tyypiltään 4002, joten standardina käytetään SFS-EN ISO 10534-1. Mittaukset suoritetaan terssikaistoittain käyttäen keskitaajuuksina 100 – 5000 Hz standardien SFS-EN 1793-3 ja SFS-EN ISO 354 mukaisesti. [53, 55, 62]. Kuvissa 36 ja 37 on kuvattu työssä käytetty laitteisto.



Kuva 36. Iso putki, jolla mitataan taajuuudet 100 – 1600 Hz. Putken sisähalkaisija on 100 mm. Kuvassa myös signaaligeneraattori sekä oikeassa reunassa liikuteltava anturi.

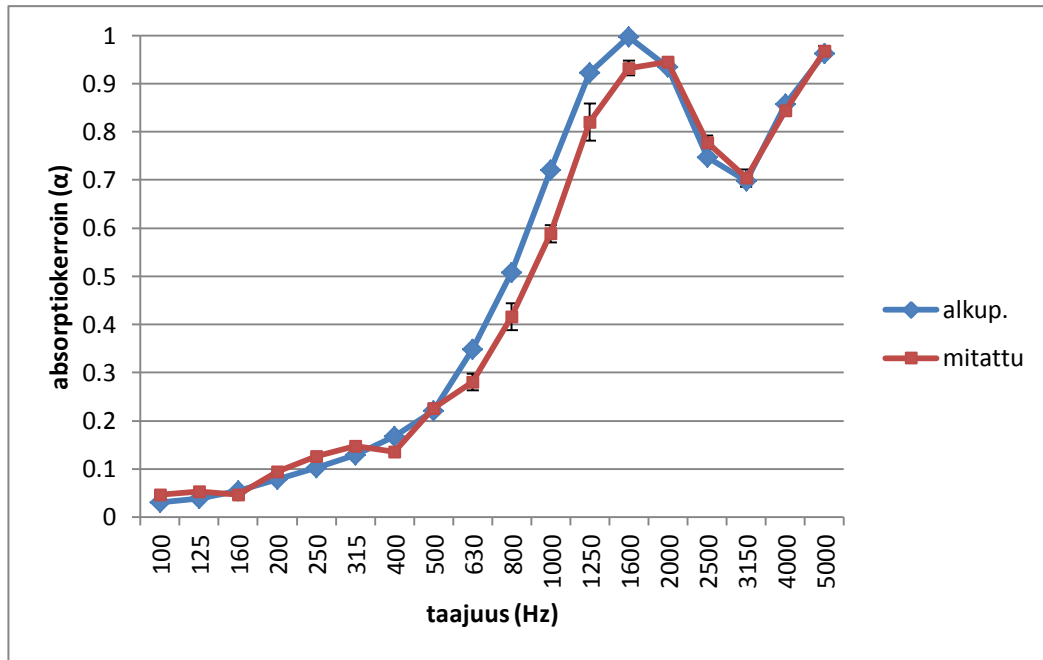


Kuva 37. Pieni putki, jolla mitataan taajuuudet 2000 – 5000 Hz. Putken sisähalkaisija on 30 mm.

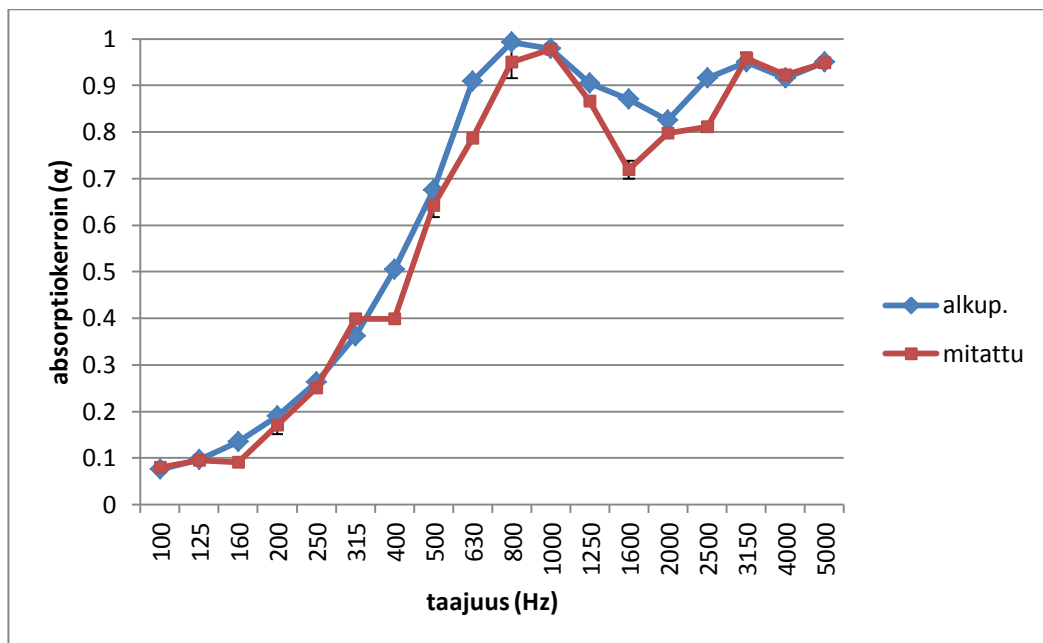
Kuten kuvista 36 ja 37 huomataan, käytössä on kaksi erikokoista putkea. Suuremmalla putkella, jonka sisähalkaisija on 100 mm, mitataan taajuuudet 100 – 1600 Hz. Pienemmällä putkella, sisähalkaisijaltaan 30 mm, mitataan taajuuudet 2000 – 5000 Hz. Mittaukset suoritetaan seuraavasti: asetetaan näytekappale putken toiseen päähän, syötetään äänisignaalia signaaligeneraattorilla ja anturia liikuttamalla etsitään seisovan ääniaallon ensimmäinen minimi ja sitä seuraava maksimi käyttäen apuna Novian –ohjelmistoa. Kun nämä on löydetty, saadaan absorptiosuhde laskettua luvussa 6.1.1 esitellyillä yhtälöillä (2), (3) ja (4). Huomataan kuitenkin, että tulokset sopivat vain materiaalien keskinäiseen vertailuun, eivätkä ole millään lailla verrannollisia kaiuntahuoneessa suoritettuihin mittauksiin, sillä impedanssiputkella käytetään kohtisuoraa äänikenttää, kun taas kaiuntahuoneessa äänikenttä on diffuusi. Käytännön kohteissa, kuten esimerkiksi juuri meluaidan tapauksessa, äänikenttä on aina diffuusi.

6.3 Putken kalibrointi

Impedanssiputken toimintavarmuus ja sen antamien tulosten luotettavuus varmistettiin testaamalla sitä materiaalinäytteillä, joiden kohtisuora absorptiokerroin tunnetaan taajuuden funktiona. Tunnetusta materiaalista testattiin paksuudet 30 mm ja 50 mm. Samalla määritettiin äänenvoimakkuus, jolla mittaukset suoritetaan. Äänenvoimakkuuden säätämisessä päädyttiin arvoon 800 mVpp. Tällöin värähtelyn amplitudi oli riittävän suuri, jotta voidaan määrittää matalien taajuuksien äänenpaineen minimi- ja maksimikohdat, mutta ei vielä liian suuri, jotta kyettiin erottamaan korkeampien taajuuksien huiput ja minimit toisistaan. Alle 630 Hz tapahtuvilla taajuuksilla huiput ja aallonpohjat eivät enää olleet teräviä, mutta ne olivat selkeästi erotettavissa. Kaikkein matalimmilla taajuuksilla, eli 100, 125 ja 160 Hz käytettiin ensimmäistä maksimia toisen (eli kahden ensimmäisen minimin välissä olevan) sijasta, sillä se sijaitsi suuren aallonpituuden vuoksi liian kaukana anturin liikerataan nähden. Molemmat materiaalipaksuudet mitattiin kahdesti käyttäen kahta eri kappaletta. Kuvissa 38 ja 39 on esitettynä kalibroinnin tuloksena saadut kuvaajat. Tarkemmat mittaustulokset on nähtävillä liitteissä 1 ja 2.



Kuva 38. 30 mm paksun näytteen kalibrointi. Virherajana mittauksissa on kahden eri mittauskerran keskihajonta.



Kuva 39. 50 mm paksun näytteen kalibrointi. Virherajana mittauksissa on kahden eri mittauskerran keskihajonta.

Kuvaajista on havaittavissa, että käytössä olevalla impedanssiputkella voidaan hyvin mitata materiaalin äänen absorptiota. Vaikka käyrät eivät olekaan täysin identtiset, on tärkeintä, että niiden muoto on samanlainen. Myöskään mittausten keskihajonnat eivät ole kovin suuret, joten voidaan olettaa, että tulokset ovat luotettavia. Virhettä saatuihin tuloksiin voi aiheuttaa putken ominaisuudet, näytteen asettuminen putkeen huonosti, epätarkkuus äänenpaineen minimissä ja maksimissa (etsitään anturia liikuttamalla, joten

virheet mahdollisia), myös materiaalissa itsessään on voinut olla jotakin eroavaisuutta verrattuna materiaalinäytteeseen, jolla aiemmin mitatut tulokset on saatu. Huomattiin myös, että taajuuksilla 250 Hz ja 315 Hz äänenpaineen minimin ja maksimin määrittäminen oli hieman hankalaa (50 mm näytteellä myös taajuus 200 Hz), johtuen ääniaallon huojunnasta. Tästä huolimatta käytössä oleva impedanssiputki soveltuu materiaalien keskinäiseen vertailuun, sillä mitattu absorptiokertoimen kuvaaja noudattelee materiaalin tunnettua kuvaajaa.

7 ABSORBOIVAN AIDAN MATERIAALIN VALMISTUS

Kappaleessa 4 esiteltyjen absorboivalta materiaalilta vaadittujen ominaisuuksien ja työn tavoitteena olevan lujitemuovijätteen kierrätyksen pohjalta valmistettiin 11 erilaista näytettä (kuvat 40 – 45) aidan sisämateriaalia ajatellen. Jokaisesta materiaalista valmistettiin halkaisijaltaan 100 mm ja 30 mm olevat kappaleet. Osa näytteistä on murskattua lujitemuovilevyä, jolla on pyritty toteuttamaan rakeinen absorboiva rakenne. Osa näytteistä on toteutettu käyttämällä lasikuitujätettä, jolloin on tavoitteena ollut kuitumainen, kosteutta kestävä rakenne.

Kuvassa 40 on nähtävillä materiaalinäyte numero 1, joka on 45 mm paksua palovilla, jonka yläpuolella (eli ääniaallon kohtaavalla puolella) on 5 mm paksua hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia. Materiaalin alapuolella (eli impedanssiputken takaseinää vasten olevalla puolella) on 1 mm samanlaista hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia. Näyte 1 mitattiin myös märkänä, jotta nähdään, miten villan kastuminen vaikuttaa äänen absorptioon. Näyte kasteltiin märäksi ja annettiin olla yön yli suljetussa pussissa.



Kuva 40. Materiaalinäyte nro 1, 45 mm paksu palovilla, jonka etupinnalla on 5 mm ja takapinnalla 1 mm paksu hartsilla ruiskutettu lasikuituroving –kerros.

Materiaalinäytteet 2 ja 3 ovat polyuretaanivaahtoa (kuva 41). Näyte 2 on 40 mm paksu ja näyte 3 20 mm. Molempien yläpinnalla on 5 mm paksu lasikuituroving (samanlainen kuin näytteessä 1) ja alapinnalla 1 mm lasikuituroving. Myös näyte 2 testattiin märkänä.



Kuva 41. Materiaalinäytteet nro 2 (vasen) ja nro 3 (oikea). Molemmat näytteet ovat polyuretaanivaahtoa, paksuuksiltaan 40 mm (näyte 2) ja 20 mm (näyte 3). Molempien etupinnalla on 5 mm ja takapinnalla 1 mm paksu hartsilla ruiskutettu lasikuituroving – kerros.

Kuvan 42 materiaalinäytteet 4 ja 5 ovat murskattua, muissa prosesseissa ylijäämäksi jäänyttä 4 mm paksua lujitemuovia. Komposiitti on rouhittu ja tämän jälkeen rouheet on kiinnitetty yhtenäiseksi kappaleeksi ruiskutetun hartsin avulla. Näin on pyritty aikaansaamaan sokkeloinen rakenne kappaleeseen. Näyte 4 on 120 mm paksu (eikä siitä ole näytekappaletta pieneen impedanssiputkeen, sillä 120 mm paksuisen ja halkaisijaltaan 30 mm testikappaleen valmistaminen tästä materiaalista olisi ollut erittäin hankalaa). Näyte 5 on 30 mm paksu.



Kuva 42. Materiaalinäytteet nro 4 (vasen) ja nro 5 (oikea) ovat murskattua lujitemuovi-levyä. Rouheet on kiinnitetty yhtenäiseksi kappaleeksi ruiskutetun hartsin avulla. Näyte 4 on 120 mm paksu ja näyte 5 30 mm.

Kuvassa 43 on esitelty materiaalinäytteet 6 ja 7, jotka on valmistettu kokonaan hartsilla ruiskutetusta lasikuiturovingista. Tällä tavoin pyrittiin hyödyntämään prosesseissa ylijäävää lasikuiturovingia ja saada kappaleesta mahdollisimman ”mutkitteleva”. Painovoiman vaikutuksesta kappaleen alareuna painui kuitenkin melko tiiviiksi paksummassa näytekappaleessa. Näyte 6 on 35 mm paksu ja näyte 7 on 16 mm paksu.



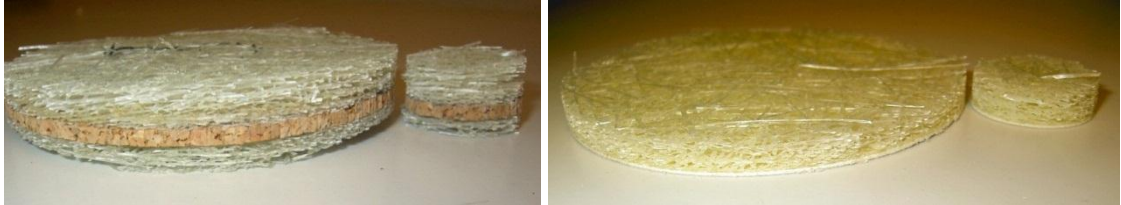
Kuva 43. Materiaalinäytteet nro 6 (vasen) ja nro 7 (oikea) ovat hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia. Näyte 6 on 35 mm paksu ja näyte 7 16 mm.

Kuvan 44 materiaalinäytteet 8 ja 9 on valmistettu samoin kuin edellä esitellyt näytteet 6 ja 7, mutta hartsia on käytetty hieman vähemmän, jotta kappaleeseen saataisiin aikaiseksi huokoisempi rakenne. Näytteen 8 paksuus on 16 mm ja näytteen 9 paksuus 27 mm.



Kuva 44. Materiaalinäytteet nro 8 (vasen) ja nro 9 (oikea) ovat myös hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia, mutta hartsia on käytetty hieman vähemmän kuin näytteissä 6 ja 7. Näytteen 8 paksuus on 16 mm ja näytteen 9 paksuus 27 mm.

Materiaalinäytteessä 10 (kuva 45) on samaa hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia kuin edellisissäkin näytteissä, mutta kappaleen keskellä on korkkia. Näytteen paksuus on 14 mm. Myös näyte 11 on hartsilla ruiskutettua lasikuiturovingia ja näytteen pohjakerroksena on pahvia.



Kuva 45. Materiaalinäytteet nro 10 (vasen) ja nro 11 (oikea) on valmistettu myös hartsilla ruiskutetusta lasikuiturovingista. Näytteessä 10 materiaalin keskellä on 3 mm paksu korkkikerros ja näytteen 11 pohjakerroksena on 1 mm paksu pahvikieppo. Näytekappaleen 10 kokonaispaksuus on 14 mm ja näytteen 11 paksuus 5 mm.

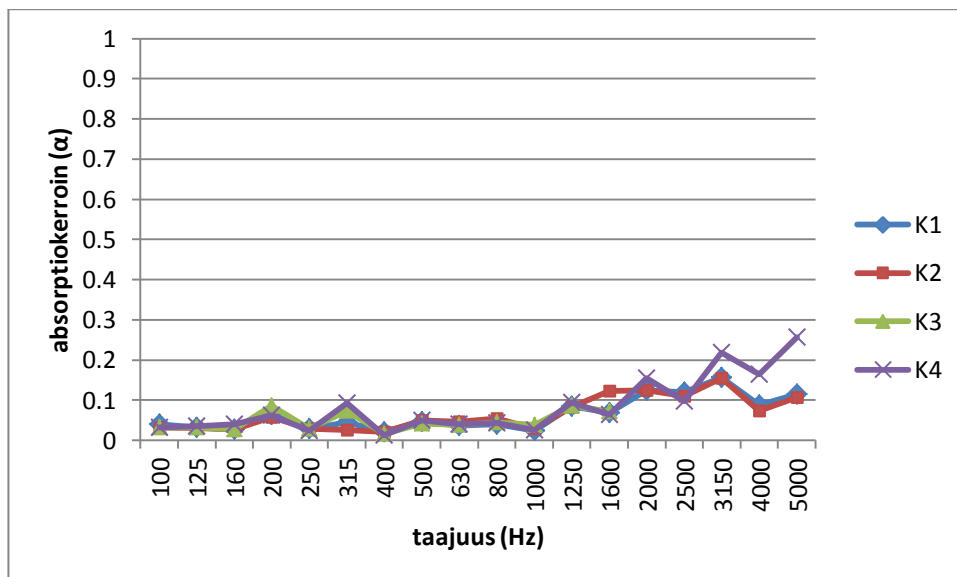
Mittauksia varten leikattiin myös neljästä erilaisesta komposiittilevystä kiekot (kuva 46), jotka mitattiin myös impedanssiputkella.



Kuva 46. Komposiitit. Kieppo K1 on paksuudeltaan 3,2 mm olevaa hiilikuitulevyä. Muut näytteet ovat lasikuitua, paksuuksiltaan 3,2 mm (kieppo K2), 3,0 mm (K3) ja 5,8 mm (K4)

8 TESTAUS JA TULOKSET

Edellisessä kappaleessa esiteltyt 11 materiaalinäytettä testattiin impedanssiputkella materiaalin äänen absorptio määrittämiseksi. Ensin mitattiin kaikki materiaalit matalilla taajuuksilla 100 – 1600 Hz käyttäen isoa putkea. Tämän jälkeen vaihdettiin paikalle pienempi putki, jolla mitattiin korkeat taajuudet 2000 – 5000 Hz. Myös komposiittimateriaalien äänen absorptio mitattiin, vaikka olikin oletettavissa, että ne eivät absorboi ääntä. Tässä oltiin oikeassa, sillä saadut tulokset ovat nähtävillä alla olevassa kuvassa.

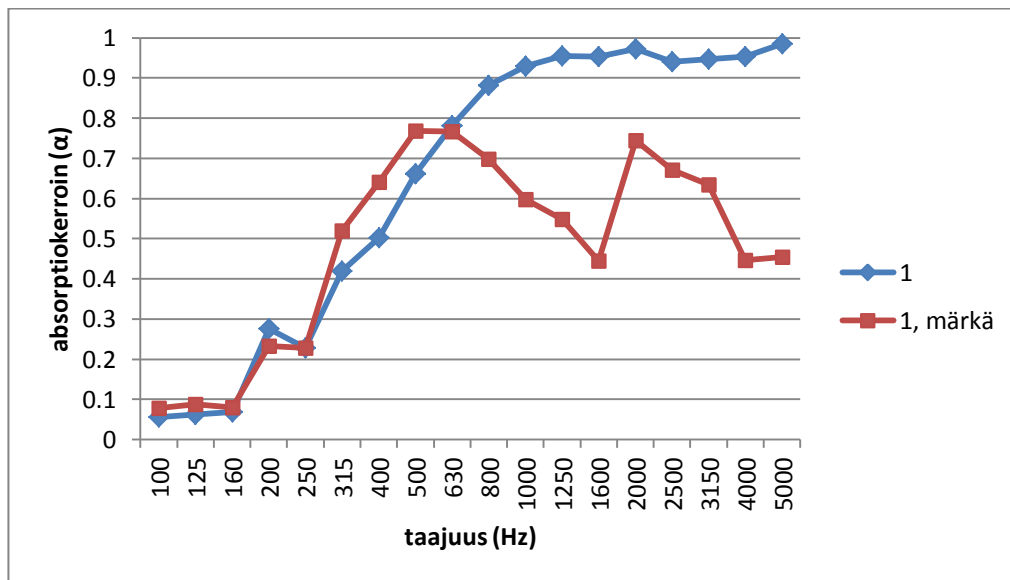


Kuva 47. Komposiittien absorptiosuhteet taajuuden funktiona.

Komposiitista kolme (näyte K3) ei ole mittaustuloksia taajuuksilla 2000 – 5000 Hz, sillä pienempi kiekko oli halkaisijaltaan liian pieni, jolloin se ei asettunut tiiviisti impedanssiputkeen ja tulokset eivät ole luotettavia (ks. kappale 6.1). Muuten kuvaajasta huomataan, että komposiitit eivät absorboi ääntä, kuten ennen mittauksia oletettiin. Näytepaksuus on toki todella ohut, 3 – 6 mm, joka tietysti vaikuttaa huonoihin absorptioarvoihin, mutta näytteiden rakenne ei anna ymmärtää parempia tuloksia olevan luvassa paksummilla näytteillä, sillä materiaali ei ole huokoista, mikä on edellytys äänen absorptiolle. Lisäksi meluaidassa ei ole järkevää käyttää kovin paljon paksumpia komposiittilevyjä materiaalikustannusten ja meluesteen painon nousun vuoksi.

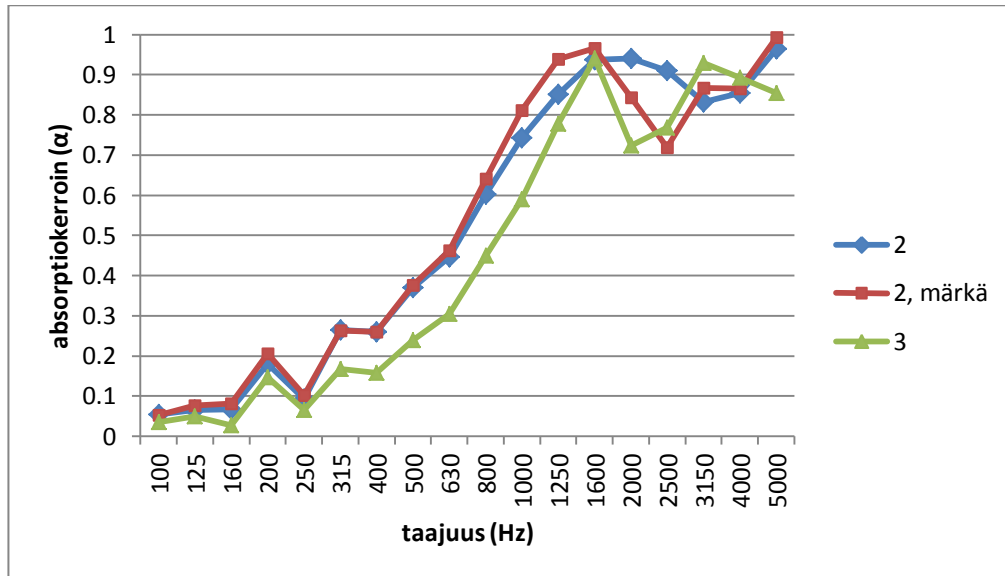
Kuvissa 48 – 52 on esitettynä materiaalinäytteiden absorptiokertoimet taajuuden funktiona. Osa näytteistä on ryhmitelty samaan kuvaajaan perustuen näytteiden samankaltaisuuteen.

Näytteen 1 kuvaajasta (kuva 48) huomataan selkeästi, kuinka absorptiokerroin putoaa rajusti korkeammilla taajuuksilla (yli 630 Hz) palovillan kastuessa. Tämä on huomionarvoista, sillä useat ääntä absorboivat meluaidat ovat sisämateriaaliltaan jotakin villaa, joka on herkkää kastumiselle.



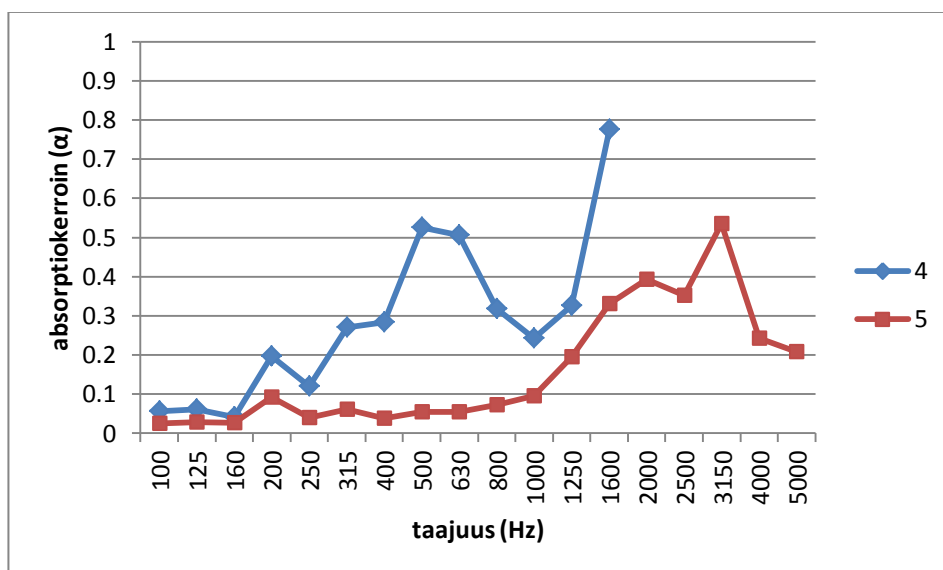
Kuva 48. Näytteen 1 (45 mm paksu palovilla) absorptiokerroin taajuuden funktiona. Materiaalinäyte mitattiin myös märkänä.

Materiaalissa 2 ei ole havaittavissa samanlaista häiriötä materiaalin kastuessa, kuten alla olevasta kuvasta on todettavissa. Materiaali 3 on samaa PU-vaahtoa kuin materiaali 2, mutta sen kuvaaja on matalilla taajuuksilla hieman alempana, johtuen sen pienemmästä paksuudesta.



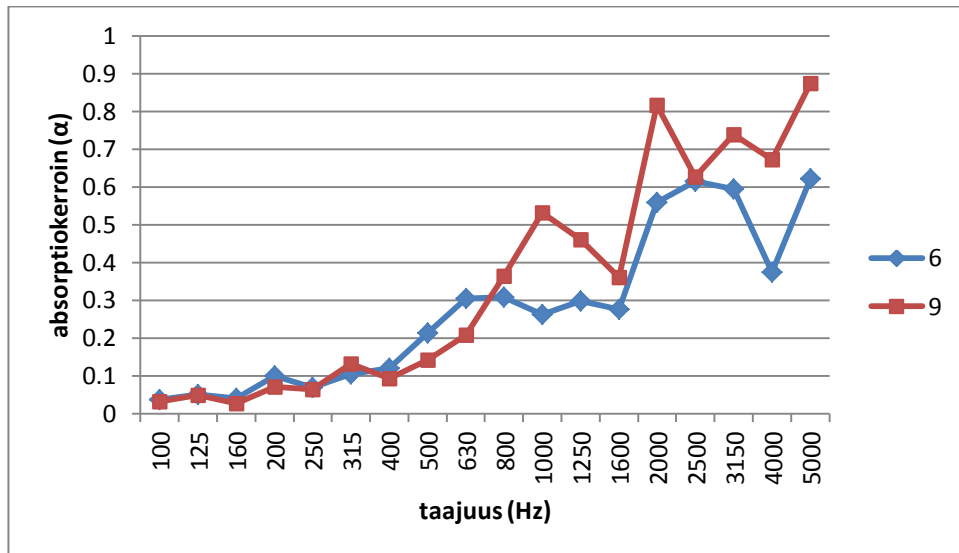
Kuva 49. Näytteiden 2 (40 mm paksu PU-vaahto) ja 3 (20 mm paksu PU-vaahto) absorptiokertoimet taajuuden funktiona. Näyte 2 mitattiin myös märkinä.

Näytteiden 4 ja 5 rakenteet ovat samankaltaiset, sillä molemmat on valmistettu lujitemuovirouheesta. Kuvasta 50 nähdään, että näytteellä 4 on paremmat absorptiokertoimen arvot, johtuen sen suuremmasta paksuudesta. Näytteen 4 arvot loppuvat taajuuteen 1600 Hz, sillä sitä ei mitattu korkeilla taajuuksilla, sillä pienempään impedanssiputkeen sopivaa näytettä ei kyetty valmistamaan.



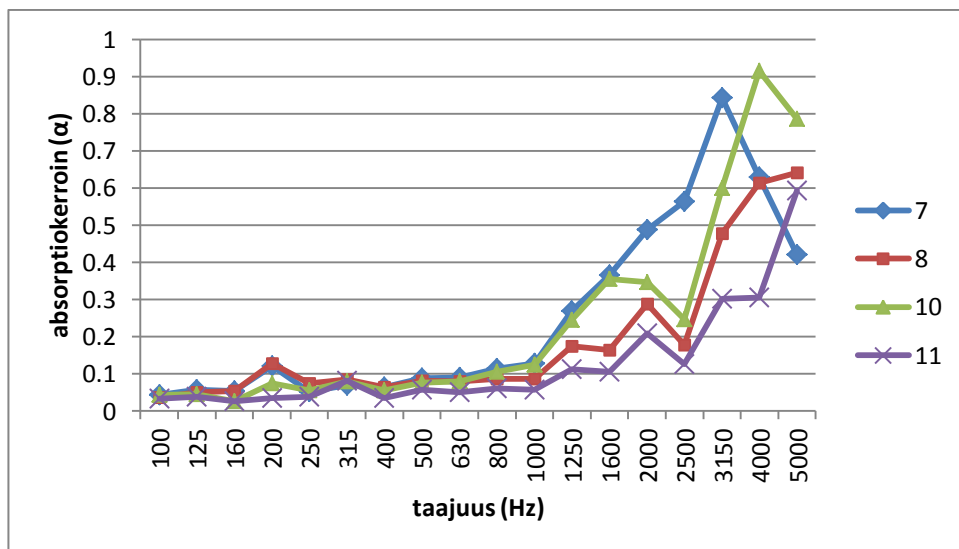
Kuva 50. Näytteiden 4 (120 mm paksu lujitemuovirouhe) ja 5 (30 mm paksu lujitemuovirouhe) absorptiokertoimet taajuuden funktiona. Näytteestä 4 mitattiin vain matalat (100 – 1600 Hz) taajuudet.

Näytteet 6 ja 9 esitellään samassa kuvaajassa (kuva 51), koska molempien rakenne on samankaltainen (lasikuituroving) ja näytepaksuus lähes sama. Materiaalilla 9 on hieman paremmat absorptiokertoimen arvot, vaikka se on 8 mm ohuempi kuin näyte 6, sillä siihen onnistuttiin saamaan hieman näytettä 6 huokoisempi rakenne, jolloin ääni imeytyy materiaaliin paremmin.



Kuva 51. Näytteiden 6 (35 mm paksu hartsilla ruiskutettu lasikuituroving) ja 9 (27 mm paksu hartsilla ruiskutettu lasikuituroving) absorptiokertoimet taajuuden funktiona.

Alla olevan kuvan näytteet 7, 8, 10 ja 11 olivat selkeästi muita näytteitä ohuempia (5 – 16 mm). Tästä johtuu myös niiden huonot absorptiokertoimen arvot matalilla taajuuksilla. Ääntä absorboivan materiaalin näytepaksuuden tulisi olla vähintään 30 mm, jotta absorptiota tapahtuisi myös matalilla taajuuksilla.



Kuva 52. Näytteiden 7 (16 mm hartsilla ruiskutettu lasikuituroving), 8 (16 mm hartsilla ruiskutettu lasikuituroving), 10 (14 mm hartsilla ruiskutettu lasikuituroving, keskellä korkkia) ja 11 (5 mm hartsilla ruiskutettu lasikuituroving, pohjana pahvikiekko) absorptiokertoimet taajuuden funktiona.

Kaikki tulokset on koottuna samaan taulukkoon liitteessä 3. On kuitenkin huomioitava, että ne eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään, sillä näytteet olivat eri paksuisia. Tulosten perusteella päädyttiin valmistamaan vielä muutama uusi näyte testattavaksi, sillä näiden materiaalinäytteiden absorptiokertoimet eivät olleet riittävän hyviä. Kuitumaiset näytteet 7 ja 8 voisivat olla potentiaalisia paksumpana, mikäli olisi mahdollista valmistaa kustannustehokkaasti niiden kaltainen rakenne paksummaksi. Aiemmalla valmistustavalla syntyivät näytteet 6 ja 9, joiden absorptiokertoimet eivät yllä meluaidan sisämateriaalilta vaadittaviin arvoihin. Palovillasta ja PU-vaahdosta valmistetut näytteet ovat valmiita ratkaisuja. Näin ollen päätettiin kehittää lujitemuovilevystä murskaamalla valmistettua materiaalia, jota käytettiin näytteissä 4 ja 5. Tavoitteena on saada rouhittua lujitemuovijätettä pienempään partikkelikokoon sekä käyttää materiaalin ”koamisvaiheessa” vähemmän hartsia, jolloin rouhitun komposiitin risaisuus synnyttää materiaaliin mutkittelevuutta.

9 TÄYDENTÄVÄT MITTAUKSET

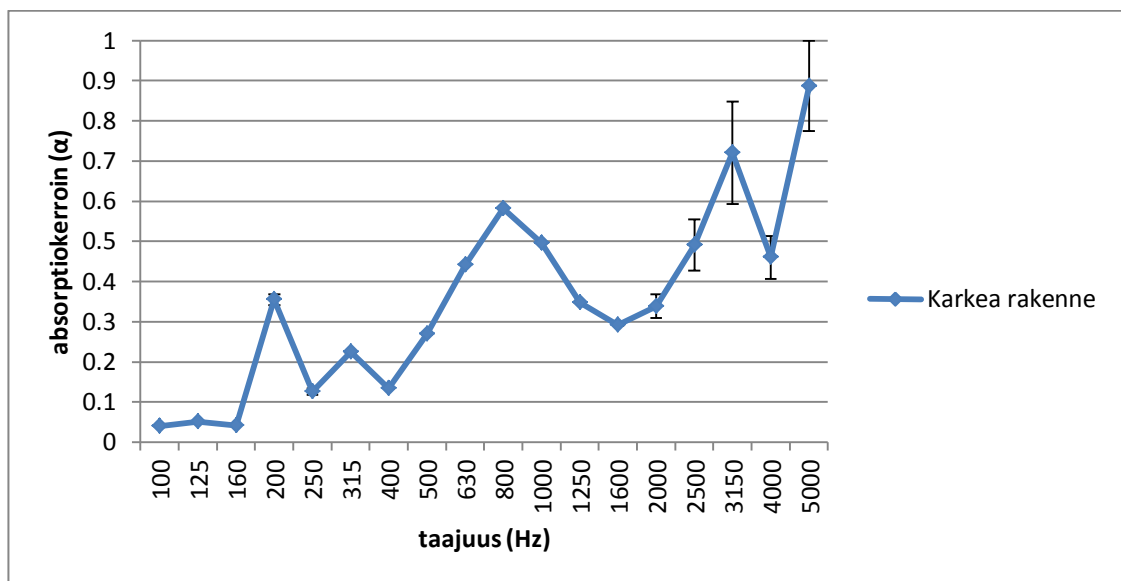
Edellisten näytteiden valmistusprosessissa havaittujen seikkojen sekä mittaustulosten pohjalta valmistettiin kolme uutta materiaalinäytettä, tavoitteena pienempi murske ja huokoisempi rakenne materiaaliin. Tällä kertaa rouhittava lasikuitulevy oli edellistä hieman ohuempaa, paksuudeltaan 3 mm. Lisäksi murskan sitomiseen käytettiin vähemmän hartsia, jotta murskatun levyn risaiset reunat jäisivät hyvin esille. Kaikki näytteet ovat noin 8 cm paksuja, jotta saatuja tuloksia olisi helppoa verrata keskenään. Paksuudeksi valittiin 8 cm, sillä meluidan sisämateriaalin paksuus on yleisesti 8 – 10 cm. Näin tuloksia voidaan heti tarkastella käyttökohdetta silmälläpitäen. Kuvissa 53 - 58 on nähtävillä kaikki valmistetut näytteet ja niiden mittaustulokset, sekä kuvissa 59 ja 60 vertailumateriaalina käytetty PU-vaaho ja sen tulokset. Rouhemateriaaleista valmistettiin ensin halkaisijaltaan 100 mm olevat näytteet matalien taajuuksien mittauksia varten. Tämän jälkeen näytteistä oli tarkoitus leikata halkaisijaltaan 30 mm olevat kappaleet, mutta leikkaus ei onnistunut. Tämän vuoksi korkeat taajuudet on mitattu hajottamalla isompi näyte ja täyttämällä impedanssiputken näytteenpidike syntyneellä murskeella noin 8 cm pituudelta, yrittäen muodostaa vastaava rakenne kuin isossa näytteessä. Isoja näytteitä oli vain yksi kutakin laatua ja ne mitattiin kahdesti. Pienet näytteet mitattiin kolmesti, täyttäen putki joka kerralla uudelleen, jotta yksittäisen huonosti toteutetun rakenteen virhe ei aiheuttaisi suurta poikkeamaa absorptiokertoimeen.

Ensimmäisessä materiaalinäytteessä on käytetty murskatun lujitemuovilevyn suurimpia rouheita. Kuten kuvasta 53 huomataan, rouheen risaiset reunat ovat hyvin esillä.



Kuva 53. Karkearouheisessa materiaalissa, paksuus 78 mm, on käytetty murskatun luji-temuovilevyn suurimpia rouheita ja ne on kiinnitetty yhtenäiseksi kappaleeksi käyttäen mahdollisimman vähän hartsia.

Kuvassa 54 on esitetty karkearouheisen materiaalin mitattu absorptiokerroin taajuuden funktiona. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 4. Kuten huomataan, korkeilla taajuuksilla virherajat ovat suuremmat kuin matalilla. Tämä johtuu siitä, että taajuuksilla 100 – 1600 Hz virherajat ovat yhdellä näyttekappaleella suoritettujen kahden eri mittauskerran tulosten keskihajonta ja taajuuksilla 2000 – 5000 Hz virherajat ovat kolmella eri materiaalinäytteellä suoritettujen mittausten keskihajonta. Korkeiden taajuuksien virherajat ovat osittain melko suuret, johtuen ”näytteenvalmistuksen” hankaluudesta, sillä aina ei ollut helppoa saada materiaalin rakennetta isoa näytettä vastaavaksi.



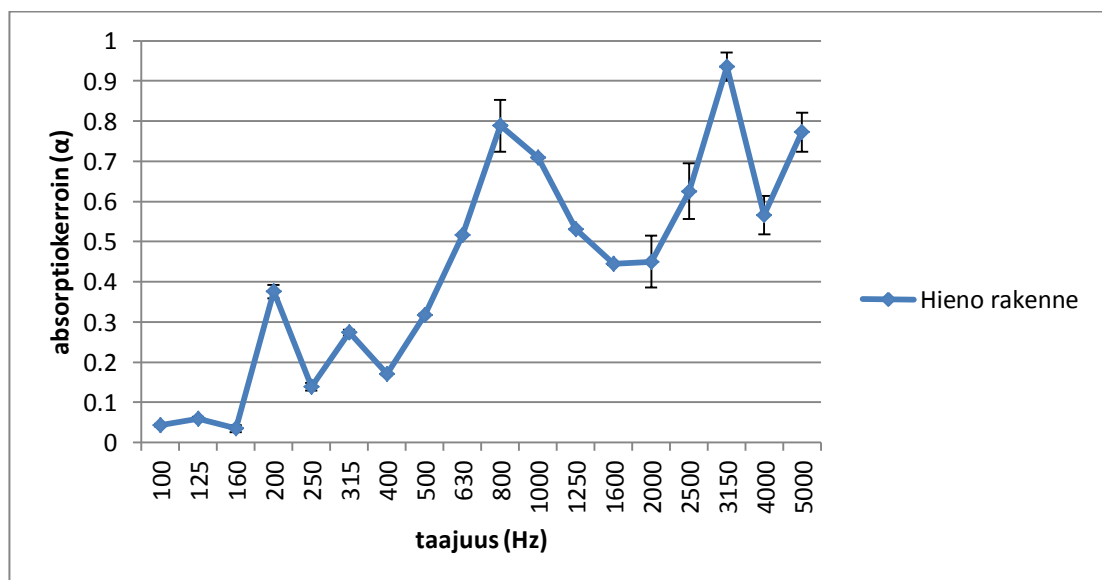
Kuva 54. Karkearouheisen materiaalin absorptiokerroin taajuuden funktiona. Taajuuksilla 100 – 1600 Hz virherajat ovat yhdellä näyttekappaleella suoritettujen kahden eri mittauskerran tulosten keskihajonta, taajuuksilla 2000 – 5000 Hz virherajat ovat kolmella eri materiaalinäytteellä suoritettujen mittausten tulosten keskihajonta.

Toisessa materiaalissa käytettiin murskeen pienempiä rouheita. Materiaalin rakenne on hienojakoisempi, huokoisempi ja mutkittelevampi kuin karkearouheisessa.



Kuva 55. Pienirouheisessa materiaalissa, paksuus 75 mm, on käytetty murskatun luji-temuovilevyn pienempiä rouheita ja ne on kiinnitetty yhtenäiseksi kappaleeksi käyttäen mahdollisimman vähän hartsia.

Alla olevassa kuvaajassa on esitetty pienirouheisen materiaalin mitattu absorptiokerroin taajuuden funktiona. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 5. Myös tässä materiaalissa virherajat ovat suuremmat korkeilla taajuuksilla, johtuen samasta syystä kuin edellisessäkin materiaalissa.



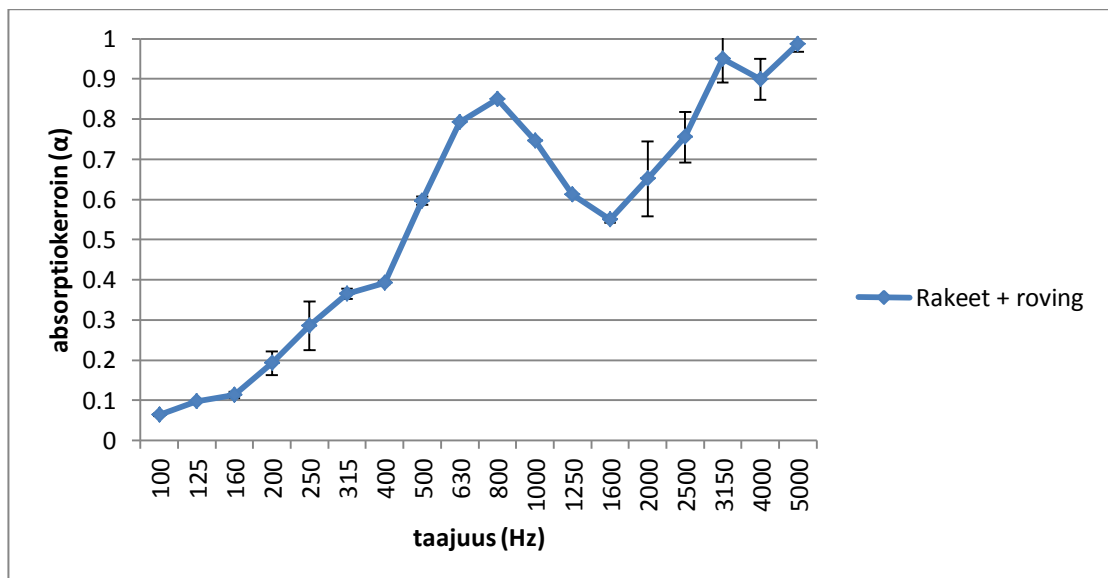
Kuva 56. Pienirouheisen materiaalin absorptiokerroin taajuuden funktiona. Taajuuksilla 100 – 1600 Hz virherajat ovat yhdellä näytekappaleella suoritettujen kahden eri mittauskerran tulosten keskihajonta, taajuuksilla 2000 – 5000 Hz virherajat ovat kolmella eri materiaalinäytteellä suoritettujen mittausten tulosten keskihajonta.

Kolmannessa näytteessä on sekä karkeita että hienojakoisempia rouheita, joiden sekaan laitettiin myös lasikuiturovingia. Näin materiaaliin saadaan huokoisempi rakenne kuin kahteen edelliseen, tavoitteena hyödyntää kuitumaisen osuuden hyvää absorptiokykyä.



Kuva 57. Kuitumaisessa materiaalissa, paksuus 80 mm, on käytetty murskatun lujite-muovin lisäksi lasikuiturovingia ja ne on kiinnitetty yhtenäiseksi kappaleeksi käyttäen mahdollisimman vähän hartsia.

Kuvaajassa on kuitumaisen materiaalin mitattu absorptiokerroin taajuuden funktiona. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 6. Virherajatarkastelu on samanlainen kuin kahdessa edellisessä materiaalissa.

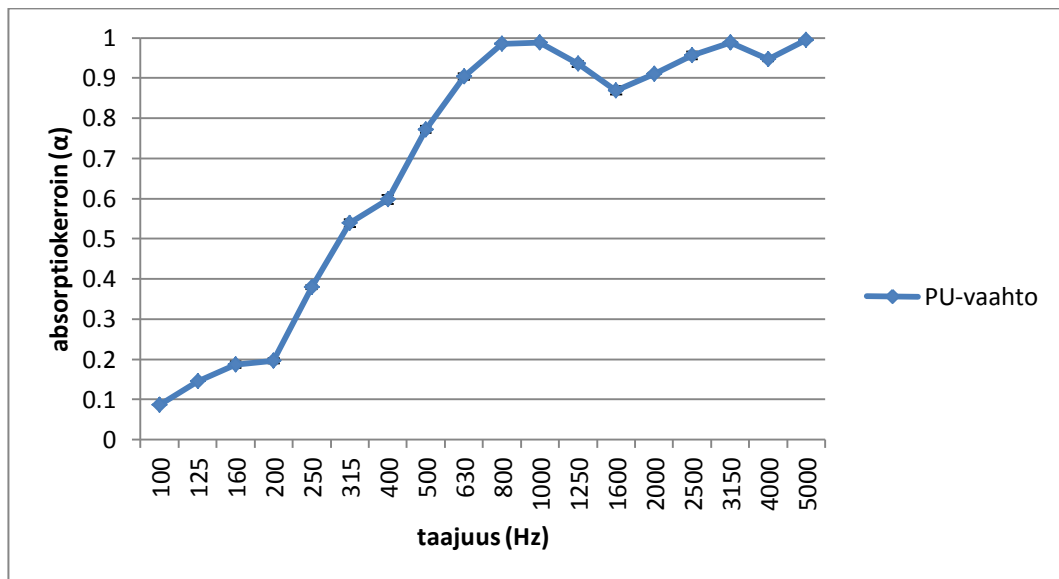


Kuva 58. Kuitumaisen materiaalin absorptiokerroin taajuuden funktiona. Taajuuksilla 100 – 1600 Hz virherajat ovat yhdellä näytekappaleella suoritetun kahden eri mittauskerran tulosten keskihajonta, taajuuksilla 2000 – 5000 Hz virherajat ovat kolmella eri materiaalinäytteellä suoritettujen mittausten tulosten keskihajonta.

Vertailumateriaalina (kuva 59), johon valmistettujen rouheisten näytteiden tuloksia voidaan verrata, käytettiin polyuretaanivaahtoa. 75 mm paksu näyte saatiin pinoamalla kaksi noin 3,7 cm paksuista kappaletta tiiviisti päällekkäin. Kuvassa 60 on vertailumateriaalin mitattu absorptiokerroin taajuuden funktiona. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 6.

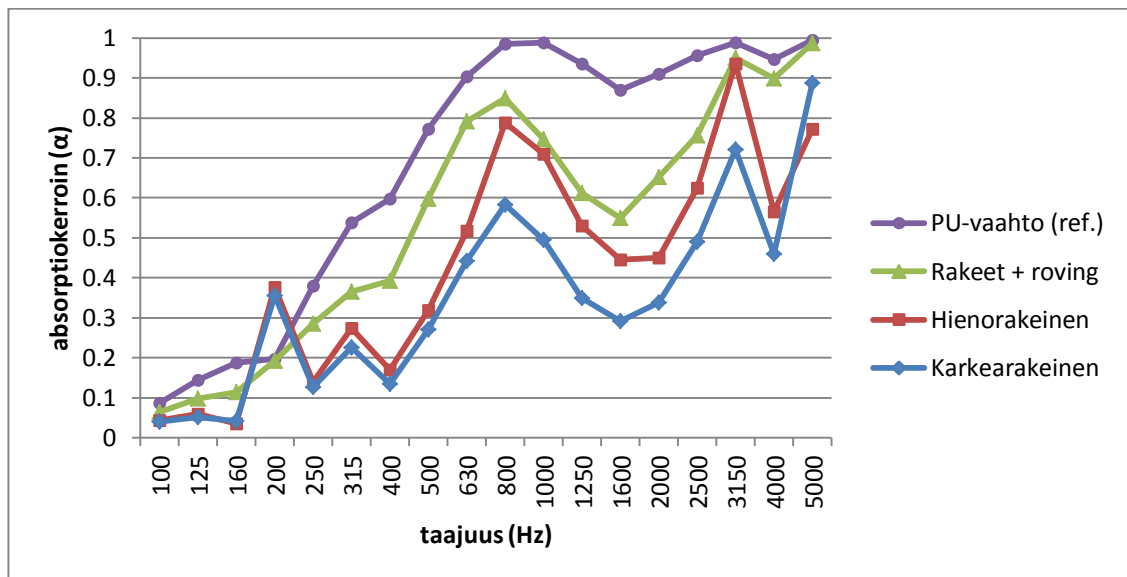


Kuva 59. Vertailumateriaalina käytetty materiaali, PU-vaaho, paksuus 75 mm



Kuva 60. Vertailumateriaalina käytetyn PU-vaahdon absorptiokerroin taajuuden funktiona. Virherajat ovat kahdella eri materiaalinäytteellä suoritettujen mittausten tulosten keskihajonta.

Esitetään kaikkien materiaalien absorptiokertoimet taajuuden funktiona ilman virherajoja samassa kuvaajassa (kuva 61), jotta tulosten vertailu olisi helpompaa.



Kuva 61. Kaikkien toisen kierroksen materiaalien absorptiokertoimet taajuuden funktiona

Kuvaajasta huomataan, että vaikka mitattuja näytekappaleita oli matalilla taajuuksilla jokaisesta murskemateriaalista vain yksi (matalilla taajuuksilla), tulokset ovat silti luotettavia ja niiden avulla voi verrata materiaaleja keskenään, sillä materiaaleilla oli samankaltaiset rakenteet ja käyrät ovat muodoiltaan samanlaiset. Tulokset seuraavat hyvin luvussa 4 esitettyjä absorptioon vaikuttavia tekijöitä. Karkearouheisella, eli suurimmalla partikkelikoolla valmistetulla materiaalilla on kaikkein huonoin äänen absorptiokyky, sillä sen absorptiokäyrä kulkee alimpana. Taajuuteen 630 Hz asti ei hienojakoisempi materiaali ole juurikaan parempi kuin karkearouheinen, mutta tämän jälkeen ero on selkeästi havaittavissa. Kuitujen lisäys murskeen sekaan parantaa absorptiokykyä, sillä kuitumaisen materiaalin käyrä on näistä kolmesta ylimpänä. Silti vertailumateriaalina käytetty kaupallinen vaihtoehto, PU-vahto, on näistä materiaaleista paras, vaikka kuitumainen murskemateriaali seuraileekin PU-vaahdon absorptiokäyrää melko lähellä aina 800 Hz taajuuteen asti.

Näiden tulosten perusteella lujitemuovimurskeesta valmistettu materiaali ei sovellu ääntä absorboivan meluaidan sisämateriaaliksi, sillä materiaalin absorptiokyky ei yllä vaaditulle tasolle. Esimerkiksi luvussa 7 esitelty palovillamateriaali, joka oli vain 45 mm paksu, saavuttaa absorptiokertoimen arvon 0,9 jo taajuudella 1000 Hz ja pysyy tätä korkeammilla taajuuksilla koko ajan tämän arvon yläpuolella, kun puolestaan 80 mm paksu kuitumainen murskemateriaali ylittää arvon 0,9 vain taajuuksilla 3150 Hz ja 5000 Hz. Lisäksi valmistettu murskemateriaali oli selkeästi painavampaa kuin vaahtomainen materiaali tai villa. Meluaidan seinäelementissä käytettävän materiaalin painavuus lisää tarvetta perustusten ja tukipilarien kantokyvyn parannukselle sekä nostaa

myös aidan kuljetus- ja pystytyskustannuksia. Kuitujen ja murskeen muodostama materiaali voi kuitenkin olla potentiaalinen tutkimussuunta, mikäli mursketta on kustannustehokkaasti mahdollista saada rouhittua vielä pienemmäksi, jolloin absorptiokyky paranisi.

Murskeesta valmistettua materiaalia voi toki käyttää ääntä absorboivana materiaalina kohteissa, joissa absorption tarve ei ole kovin suuri, vaan heikompikin absorptiokyky riittää. Parempia käyttökohteita murskatun lasikuitulevyn kierrätykselle on kuitenkin esimerkiksi rouheen käyttö meluaidan muissa osissa, kuten tolpissa tai muotoelementeissä (rimoitukset yms.), sementin polttoprosessissa energiaksi, täyteaineena muovituotteissa tai mahdollisuuksien mukaan myös maanrakennuksen täytemateriaalina.

10 LUJITEMUOVIRAKENTEISEN MELU AidAN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Kuten jo aiemmin on todettu (luvussa 4), lujitemuovia voi käyttää meluaitojen rakennusmateriaalina, kunhan lujuus- ja muut vaatimukset täyttyvät. Mitään estettä komposiittien käytölle ei ole. Sen sijaan etuna on esimerkiksi pitkäikäisyys ja keveys ja muotoilun vapaus. Lujitemuovin käytössä kannattaa keskittyä aidan ulkorakenteisiin, absorboivaksi sisämateriaaliksi murskattu lujitemuovijäte ei tällä hetkellä sovellu, vaan on järkevää käyttää kaupallisesti markkinoilla olevia ääntä absorboivia materiaaleja, sillä ääntä absorboivien meluaitojen kysyntä ei ole kasvanut viime vuosina [63, 64, 65, 66].

Lujitemuovirakenteisen meluaidan tulevaisuudennäkymiä selvitetessä haasteltiin puhelimitse Turun, Tampereen, Helsingin ja Espoon kaupunkien työntekijöitä, jotka työskentelevät liikenteen- ja katujensuunnittelun parissa. Turusta haastatteluun vastasi liikennesuunnitteluinsinööri Jaana Mäkinen, Tampereelta katuinsinööri Kalevi Salonen, Helsingistä projektinjohtaja Jarkko Karttunen ja Espoosta katuinsinööri Salla Hänninen. Haastatellut henkilöt ovat mukana meluesteiden suunnittelu- ja hankintaprojektien eri vaiheissa erilaisissa tehtävissä sekä tekevät esimerkiksi meluselvityksiä [63, 64, 65, 66]. Haastatteluissa kysyttiin muun muassa meluaidan valintaan vaikuttavien erilaisten kriteerien tärkeyttä sekä meluaitojen materiaalivalintoja. Haastattelukysymykset sekä yhteenvedo vastauksista ovat liitteessä 8.

Haastattelujen perusteella [63 - 66] tärkeimmäksi ominaisuudeksi meluaidoissa tarkentui aidan ulkonäkö. Aidan on sulauduttava käyttöympäristöönsä, joko maisemoinnin tai hyvän designin avulla. Nämä molemmat on toteutettavissa komposiittia käyttämällä. Lujitemuovilla on mahdollista käyttää erilaisia värejä, muotoja ja pinnanlaatuja. Aitaan voi jopa suunnitella upotettuja istutuksia lujitemuovin hyvän kosteudenkeston ansiosta. Myös valojen tai muiden sähköisten elementtien käyttö aidan rakenteissa on mahdollista, sillä lujitemuovi ei johda sähköä. Diffraktiota voi pyrkiä vähentämään ”piilottamalla” diffraktiota pienentävät elementit (esimerkiksi kuvan 9 kaltaiset) osaksi aidan muotoilua.

Myös käyttöikä on kiinnitetty huomiota [63 - 66]. Meluaita on samalla paikalla mahdollisesti jopa useita vuosikymmeniä, joten sen on kestävä hajoamatta ja ulkonäön muuttumatta monenlaisia olosuhteita. Lujitemuovi on kestävä materiaali, erityisesti kosteudenkestävyys on hyvä verrattuna perinteisiin meluaidan materiaaleihin. Komposiitti ei lahoa eikä ruostu. Tämän vuoksi sen käyttöikäkin on pitkä.

Kustannukset aiheuttavat jonkin verran rajoitteita meluaidan suunnittelulle, ulkonäön ollessa kuitenkin tärkeämpi kriteeri [63 - 66]. Osa kustannuksista aiheutuu meluaidan perustuksista. Lujitemuovin keveyden ansiosta aidan jänneväli voidaan pitää

suurena, jolloin tarvittavien perustusten lukumäärä pienenee ja kustannukset alenevat. Keveyden vuoksi myös komposiittiaidan elementtien kuljetukseen ja pystytykseen vaadittavat kustannukset pienenevät, sillä näihin ei tarvita raskaita laitteita tai välineitä.

Aidan korjattavuuden ja huollettavuuden tulisi olla helppoa [63 - 66]. Tämäkin toive voidaan huomioida jo aidan suunnitteluvaiheessa, jolloin aidan rakenteen tulisi olla sellainen, että rikkoutuneen kohdan aidasta voi helposti vaihtaa ehjään. Esille nousi myös läpinäkyvän meluaidan, tai ainakin läpinäkyvien osien, puhtaanapidon haasteellisuus. Vaikka läpinäkyvä meluaita koetaankin yleisesti ”vähiten rumana”, se ei silti välttämättä ole hyvä ratkaisu, sillä Joynt et al. [67] havaitsivat tutkimuksissaan, että läpinäkyvän meluaidan ei koeta vaimentavan liikennemelua yhtä paljon kuin muiden aitojen. Vaimennus oli kaikissa empiirisissä tutkimustapauksissa (metallinen, puinen, betonista valmistettu, kasvillisuus ja läpinäkyvä aita) sama, mutta läpinäkyvän aidan kohdalla koehenkilöt kokivat vaimennuksen pienemmäksi.

Tarkempia suosituksia ja suunnitelmia lujitemuovin käytöstä ei ole mahdollista antaa, sillä meluaidat suunnitellaan aina tapauskohtaisesti käyttökohteeseensa. [63 - 66]

11 YHTEENVETO

Ensisijainen toimenpide meluntorjunnassa on kaavoitus sekä rakennusten sijoittelu. Mikäli nämä eivät ole riittäviä tai mahdollisia toteuttaa, on rakennettava meluaitoja. Meluaidalla on oltava riittävät lujuusominaisuudet ja sen on täytettävä myös muita vaatimuksia. Yleisimmät tällä hetkellä Suomessa käytettävät materiaalit meluaidoissa ovat puu, betoni, kivi ja metalli. Myös komposiitilla voi saavuttaa vaaditut ominaisuudet. Etuna perinteisiin materiaaleihin on lujitemuovin hyvä korroosion- ja kosteudenkesto, joka tarjoaa pitkän käyttöiän. Lujitemuovi ei vääntyile kuten puu, ja sen ansiosta säilyttää akustiset ominaisuutensa pitkänkin käyttöiän jälkeen. Lisäksi lujitemuovi antaa uusia mahdollisuuksia meluaidan muotoilun ja ulkonäön suunnitteluun.

Ääntä absorboivan meluaidan sisämateriaalin on oltava voimakkaasti ääntä absorboivaa, jotta meluaitaa voi markkinoida absorboivana. Materiaalin äänen absorptiokykyyn vaikuttavat ilman virtausvastus (suurempi ilman virtausvastus parantaa absorptiota, aina arvoon 1000 asti), materiaalin huokoisuus (huokosten lukumäärä ja muoto), kuitupaksuus kuitumaisilla materiaaleilla (kuitupaksuuden pienentyessä absorptio paranee, kuidun poikkileikkauksen muodolla ei ole merkitystä), tiheys (tiheämpi rakenne hyvä korkeilla taajuuksilla, avoimempi matalilla taajuuksilla), näytepaksuus (vaikuttaa etenkin matalilla taajuuksilla, jotka vaativat paksun materiaalikappaleen vaimentumakseen), materiaalin rakenteen mutkittelevuus (mutkitteleva rakenne absorboi paremmin) sekä raekoko rakeisilla materiaaleilla (pienempi raekoko parantaa absorptiokykyä).

Työssä tutkittiin 11 erilaisen lujitemuovijätteen valmistetun materiaalin äänen absorptiokykyä impedanssiputken avulla. Osa näytteistä oli valmistettu murskaamalla lujitemuovilevyä ja rakeet ruiskutettiin hartsin avulla kiinteäksi kappaleeksi, osassa materiaaleista oli käytetty lasikuiturovingia, joka ruiskutettiin hartsilla yhteen kuitumaiseksi rakenteeksi. Tulokset olivat suuntaa-antavia ja niiden sekä näytteiden valmistusprosessissa havaittujen seikkojen pohjalta valmistettiin vielä kolme uutta näytettä.

Uusissa näytteissä rouheen raekoko oli hieman pienempi ja valmistuksessa käytettiin vähemmän hartsia, jotta rouheen risaiset reunat saatiin esille. Yhteen näytteistä lisättiin rakeiden sekaan myös lasikuituja. Tulosten perusteella voidaan todeta, että lujitemuovimurskeesta valmistettuja materiaaleja ei ole järkevää käyttää meluaidan ääntä absorboivana sisämateriaalina, vaan lujitemuovin käytössä kannattaa keskittyä aidan ulkorakenteisiin.

Murskatun lasikuitulevyn kierrätykselle parempia käyttökohteita ovat esimerkiksi rouheen käyttö meluaidan muissa osissa, kuten tolissa tai muotoelementeissä (rimoitukset yms.), sementin polttoprosessissa energiaksi, täyteaineena muovituotteissa tai mahdollisuuksien mukaan myös maanrakennuksen täytemateriaalina.

LÄHTEET

- [1] Zhou Hong, Li Bo, Huang Guangsu, He Jia. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *Journal of Sound and Vibration* 304 (2007) 1-2, pp. 400-406
- [2] Santeri Pakkanen. Meluongelmat kasvattavat melusteiden markkinoita [WWW]. *Rakennuslehti* 7.11.2002 [viitattu 23.2.2012]. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/uutiset/rakentaminen/3658.html>
- [3] Suomen kuntatekniikan yhdistys. *Melustekäsikirja*. Jyväskylä 1997, Gummerus Kirjapaino Oy. 121 s.
- [4] Riitta Ollila. Meluaita [WWW]. *Rakennustaito* 5/2000 [viitattu 23.2.2012]. Saatavissa: http://www.rakennustieto.fi/lehdet/rakennustaito/index/lehti/P_472.html
- [5] L 4.2.2000/86 Ympäristönsuojelulaki
- [6] Tien melusteiden suunnittelu. Helsinki 2010, Liikenneviraston ohjeita 16/2010. 92 s.
- [7] VNa 19.8.2004/801 Valtioneuvoston asetus Euroopan yhteisön edellyttämistä meluselvityksistä ja meluntorjunnan toimintasuunnitelmista
- [8] Esa Blomberg, Ari Lepoluoto. Audiokirja [WWW]. 2005 [viitattu 7.12.2012]. Saatavissa: <http://ari.lepoluo.to/audiokirja/>
- [9] VNp 29.10.1992/993 Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista
- [10] Kaisa Huhtiniemi. Miljoonalla eurolla syntyy kilometri meluaitaa [WWW]. *Tekniikka & talous* 23.5.2002 [viitattu 23.2.2012]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/rakennus/miljoonalla+eurolla+syntyy+kilometri+meluaitaa/a25972>
- [11] Kylliäinen, M. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere 2006, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Tutkimusraportti 137. 205 s.
- [12] Euroopan parlamentti: Faktatietoja. 4.9.5. Melu. [WWW]. Euroopan parlamentti 10.3.2000. [viitattu 18.7.2012]. Saatavissa: http://www.europarl.europa.eu/factsheets/4_9_5_fi.htm

- [13] Lehto, H., Luoma, T., Havukainen, R., Leskinen, J. Fysiikka 2. Helsinki 2005, Kustannusosakeyhtiö Tammi. 304 s.
- [14] Eric Rosenberg. Continued investigation of noise reduction by a random-edge noise barrier [WWW]. Acoustical Society of America 133rd Meeting. 17.6.1997 [viitattu 11.4.2012]. Saatavissa: <http://www.acoustics.org/press/133rd/2pnsa4.html>
- [15] Highway Traffic Noise, Noise Barriers [WWW]. Office of Planning, Environment & Realty (HEP). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. [viitattu 4.12.2012]. Saatavissa: http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/noise_barriers/
- [16] G. R. Watts. Acoustic performance of parallel traffic noise barriers. Applied Acoustics 47 (1996) 2, pp. 95-119
- [17] Tomonao Okubo, Kohei Yamamoto. Procedures for determining the acoustic efficiency of edge-modified noise barriers. Applied Acoustics 68 (2007) 7, pp. 797-819
- [18] Santeri Pakkanen. Bitumoidusta kevytsorasta aita puoleen hintaan [WWW]. Tekniikka & talous 20.5.2002 [viitattu 23.2.2012]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/incoming/bitumoidusta+kevytsorasta+aita+puoleen+hintaan/a30457>
- [19] G. R. Watts. Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites. Applied Acoustics 47 (1996) 1, pp. 47-66
- [20] SFS-EN 1793-2. Teiden meluesteet. Akustisten ominaisuuksien määrittäminen. Osa 2: Tuotekohtainen ilmaäänien eristävyys. Helsinki 1997, Suomen standardisoimisliitto. 15 s.
- [21] SFS-EN 1793-1. Teiden meluesteet. Akustisten ominaisuuksien määrittäminen. Osa 1: Tuotekohtainen äänen absorptio. Helsinki 1997, Suomen standardisoimisliitto. 15 s.
- [22] K. M. Li, M. K. Law, M. P. Kwok. Absorbent parallel noise barriers in urban environments. Journal of Sound and Vibration 315 (2008) 1-2, pp. 239-257
- [23] Claudio Cianfrini, Massimo Corcione, Lucia Fontana. Experimental verification of the acoustic performance of diffusive roadside noise barriers. Applied Acoustics 68 (2007) 11-12, pp. 1357-1372

- [24] SFS-EN 1794-1. Road traffic noise reducing devices. Non-acoustic performance. Part 1: Mechanical performance and stability requirements. Helsinki 2011, Suomen standardisoimisliitto. 30 s.
- [25] SFS-EN 1794-2. Road traffic noise reducing devices. Non-acoustic performance. Part 2: General safety and environmental requirements. Helsinki 2011, Suomen standardisoimisliitto. 30 s.
- [26] Meluesteperustukset. Helsinki 1994, Tielaitos, Kehittämiskeskus. 37 s.
- [27] Eridomic Oy:n tuote-esite [WWW]. [viitattu 8.11.2012]. Saatavissa: <http://www.eridomic.fi/pdf/X70-36104.pdf>
- [28] Suomen rakennustuote Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 8.11.2012]. Saatavissa: <http://www.suomenrakennustuote.fi/elementit/>
- [29] Rudus Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: <http://www.rudus.fi/tuotteet/infraelementit/tie-ja-siltarakentaminen/meluseinat>
- [30] Parma Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: <http://217.146.76.150/tuotteet/infratuotteet/meluseinaet-ja-tiekaiteet>
- [31] Mikkelin betoni Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: <http://www.mikkelinbetoni.fi/tuotteet.php>
- [32] Lujabetoni Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: <http://www.lujabetoni.fi/infrarakentaminen>
- [33] Rautaruukki Oyj:n kotisivut, Meluesteet [WWW]. [viitattu 3.4.2012]. Saatavissa: <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Infrastruktuuriratkaisut/Meluesteet>
- [34] Hansa Rakenne Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 3.4.2012]. Saatavissa: <http://www.hansarakenne.fi/>
- [35] Oy Viapipe Ab:n kotisivut [WWW]. [viitattu 9.11.2012]. Saatavissa: <http://www.viapipe.fi/tuotteet/kivikorit>
- [36] Fibergrate Composite Structures Inc:n kotisivut [WWW]. [viitattu 24.11.2012]. Saatavissa: <http://www.fibergrate.com/>

- [37] Thomas Keller, Florian Riebel, Till Vallée. GFRP posts for railway noise barriers – Experimental validation of load-carrying performance and durability. *Composite Structures* 85 (2008) 2, pp. 116-125
- [38] Jorge P. Arenas, Malcolm J. Crocker. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound and Vibration* 44 (2010) 7, pp. 12-17
- [39] Frank Fahy. *Foundations of engineering acoustics*. London 2001, Elsevier Academic Press. 432 p.
- [40] X. Sagartzazu, L. Hervella-Nieto, J.M. Pagalday. Review in Sound Absorbing Materials. *Archives of Computational Methods in Engineering* 15 (2008) 3, pp. 311-342
- [41] Hoda S. Seddeq. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 3(4) (2009), pp. 4610-4617
- [42] M. J. Swift, P. Briš, K. V. Horoshenkov. Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate. *Applied Acoustics* 57 (1999) 3, pp. 203-212
- [43] W. Pannert, R. Winkler, M. Merkel. On the acoustical properties of metallic hollow sphere structures (MHSS). *Materials Letters* 63 (2009) 13-14, pp. 1121-1124
- [44] K. O. Ballagh. Acoustical properties of wool. *Applied Acoustics* 48 (1996) 2, pp. 101-120
- [45] Naoki Kino, Takayasu Ueno. Evaluation of acoustical and non-acoustical properties of sound absorbing materials made of polyester fibres of various cross-sectional shapes. *Applied Acoustics* 69 (2008) 7, pp. 575-582
- [46] Koizumi, T., N. Tsujiuchi, A. Adachi. *The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers, high performance*. WIT Press.
- [47] M. Sobral, A. J. B. Samagaio, J. M. F. Ferreira, J. A. Labrincha. Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate. *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 2, pp. 427-433
- [48] Glan Oy:n kotisivut [WWW]. [viitattu 17.10.2012]. Saatavissa: <http://www.glan.fi/meluesteaidat.html>

- [49] Tilon Composites:in kotisivut [WWW]. [viitattu 7.3.2012]. Saatavissa: <http://www.tiloncomposites.com/page18.html>
- [50] Henan Huarun Environmental Engineering Co., Ltd:n kotisivut [WWW]. [viitattu 17.10.2012]. Saatavissa: http://www.xrhr.com/boligang_en_01.html
- [51] Rostand Tayong, Thomas Dupont, Philippe Leclaire. Experimental investigation of holes interaction effect on the sound absorption coefficient of micro-perforated panels under high and medium sound levels. *Applied Acoustics* 72 (2011) 10, pp. 777-784
- [52] Dah-You Maa. Potential of microperforated panel absorber. *Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1998) 5. pp. 2861-2866
- [53] SFS-EN 1793-3. Teiden meluesteet. Akustisten ominaisuuksien määrittäminen. Osa 3: Standardisoitu liikennemelun spektri. Helsinki 1997, Suomen standardisoimisliitto. 11 s.
- [54] VTT:n kotisivut [WWW]. [viitattu 18.4.2012]. Saatavissa: http://www.vttexpertservices.fi/files/services/exp/brochures_fin/ymparistomelu_esite_suomi.pdf
- [55] SFS-EN ISO 354. Akustiikka. Ääniabsorption mittaaminen kaiuntahuoneessa. Helsinki 2003, Suomen standardisoimisliitto. 33 s.
- [56] SFS-EN ISO 10140-2. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Helsinki 2010, Suomen standardisoimisliitto. 28 s.
- [57] SFS-EN ISO 10140-4. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 4: Measurement procedures and requirements. Helsinki 2010, Suomen standardisoimisliitto. 28 s.
- [58] SFS-EN ISO 10140-5. Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment. Helsinki 2010, Suomen standardisoimisliitto. 50 s.
- [59] SFS-EN ISO 10534-1. Akustiikka. Äänen absorptiosuhteen ja impedanssin määrittäminen impedanssiputkilla. Osa 1: Seisovan aallon suhdetta käyttävä menetelmä. Helsinki 2001, Suomen standardisoimisliitto. 30 s.

- [60] SFS-EN ISO 10534-2. Akustiikka. Äänen absorptiosuhteen ja impedanssin määrittäminen impedanssiputkilla. Osa 2: Siirtofunktiomenetelmä. Helsinki 2001, Suomen standardisoimisliitto. 37 s.
- [61] Naoki Kino, Takayasu Ueno. Investigation of sample size effects in impedance tube measurements. *Applied Acoustics* 68 (2007) 11-12, pp. 1485-1493
- [62] Instruction Manual, Standing wave apparatus type 4002. Brüel & Kjær.
- [63] Mäkinen, Jaana. Liikennesuunnitteluinsinööri, Turun kaupunki. Puhelinhaastattelu 21.2.2013
- [64] Salonen, Kalevi. Katuinsinööri, Tampereen kaupunki. Puhelinhaastattelu 21.2.2013
- [65] Karttunen, Jarkko. Projektinjohtaja, Helsingin kaupunki. Puhelinhaastattelu 25.2.2013
- [66] Hänninen, Salla. Katuinsinööri, Espoon kaupunki. Puhelinhaastattelu 25.2.2013
- [67] Jennifer L.R. Joynt, Jian Kang. The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers. *Science of The Total Environment* 408 (2010) 20, pp. 4368-4375

LIITTEET

Liite 1. Impedanssiputken kalibrointi. 30 mm paksun näytteen mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	826	10	82.6	81.6	83.6	0.976077	0.952725	0.047275
125	617	8	77.125	76.125	78.125	0.9744	0.949455	0.050545
160	290	3	96.66667	95.66667	97.66667	0.979522	0.959464	0.040536
200	587	15	39.13333	38.13333	40.13333	0.950166	0.902816	0.097184
250	2217	77	28.79221	27.79221	29.79221	0.932868	0.870243	0.129757
315	840	33	25.45455	24.45455	26.45455	0.924399	0.854513	0.145487
400	2216	83	26.6988	25.6988	27.6988	0.927795	0.860803	0.139197
500	11643	736	15.81929	14.81929	16.81929	0.881089	0.776318	0.223682
630	5953	465	12.80215	11.80215	13.80215	0.855095	0.731188	0.268812
800	7833	983	7.968464	6.968464	8.968464	0.776996	0.603723	0.396277
1000	924	195	4.738462	3.738462	5.738462	0.651475	0.424419	0.575581
1250	1227	460	2.667391	1.667391	3.667391	0.454653	0.20671	0.79329
1600	229	129	1.775194	0.775194	2.775194	0.27933	0.078025	0.921975
2000	379	233	1.626609	0.626609	2.626609	0.238562	0.056912	0.943088
2500	149	55	2.709091	1.709091	3.709091	0.460784	0.212322	0.787678
3150	273	78	3.5	2.5	4.5	0.555556	0.308642	0.691358
4000	210	93	2.258065	1.258065	3.258065	0.386139	0.149103	0.850897
5000	401	268	1.496269	0.496269	2.496269	0.198804	0.039523	0.960477

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	831	10	83.1	82.1	84.1	0.976219	0.953003	0.046997
125	629	9	69.88889	68.88889	70.88889	0.971787	0.94437	0.05563
160	292	4	73	72	74	0.972973	0.946676	0.053324
200	657	16	41.0625	40.0625	42.0625	0.952452	0.907164	0.092836
250	2224	73	30.46575	29.46575	31.46575	0.936439	0.876918	0.123082
315	835	34	24.55882	23.55882	25.55882	0.921749	0.849621	0.150379
400	2208	79	27.94937	26.94937	28.94937	0.930914	0.866601	0.133399
500	11701	760	15.39605	14.39605	16.39605	0.878019	0.770918	0.229082
630	6042	523	11.55258	10.55258	12.55258	0.84067	0.706726	0.293274
800	7172	1018	7.045187	6.045187	8.045187	0.751404	0.564608	0.435392
1000	908	205	4.429268	3.429268	5.429268	0.631626	0.398952	0.601048
1250	1100	482	2.282158	1.282158	3.282158	0.390645	0.152603	0.847397
1600	223	137	1.627737	0.627737	2.627737	0.238889	0.057068	0.942932
2000	393	245	1.604082	0.604082	2.604082	0.231975	0.053812	0.946188
2500	120	42	2.857143	1.857143	3.857143	0.481481	0.231824	0.768176
3150	285	87	3.275862	2.275862	4.275862	0.532258	0.283299	0.716701
4000	303	129	2.348837	1.348837	3.348837	0.402778	0.16223	0.83777
5000	661	481	1.37422	0.37422	2.37422	0.157618	0.024844	0.975156

Liite 2. Impedanssiputken kalibrointi. 50 mm paksun näytteen mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	936	20	46.8	45.8	47.8	0.958159	0.918069	0.081931
125	560	15	37.33333	36.33333	38.33333	0.947826	0.898374	0.101626
160	299	7	42.71429	41.71429	43.71429	0.954248	0.91059	0.08941
200	632	27	23.40741	22.40741	24.40741	0.918058	0.84283	0.15717
250	1841	130	14.16154	13.16154	15.16154	0.868087	0.753576	0.246424
315	906	114	7.947368	6.947368	8.947368	0.776471	0.602907	0.397093
400	1904	241	7.900415	6.900415	8.900415	0.775291	0.601077	0.398923
500	7860	1890	4.15873	3.15873	5.15873	0.612308	0.374921	0.625079
630	5458	1998	2.731732	1.731732	3.731732	0.464056	0.215348	0.784652
800	2507	1432	1.750698	0.750698	2.750698	0.272912	0.074481	0.925519
1000	907	687	1.320233	0.320233	2.320233	0.138018	0.019049	0.980951
1250	659	304	2.167763	1.167763	3.167763	0.36864	0.135895	0.864105
1600	307	91	3.373626	2.373626	4.373626	0.542714	0.294538	0.705462
2000	476	179	2.659218	1.659218	3.659218	0.453435	0.205603	0.794397
2500	117	47	2.489362	1.489362	3.489362	0.426829	0.182183	0.817817
3150	211	133	1.586466	0.586466	2.586466	0.226744	0.051413	0.948587
4000	242	139	1.741007	0.741007	2.741007	0.270341	0.073084	0.926916
5000	737	481	1.532225	0.532225	2.532225	0.210181	0.044176	0.955824

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	926	19	48.73684	47.73684	49.73684	0.959788	0.921194	0.078806
125	556	13	42.76923	41.76923	43.76923	0.954306	0.9107	0.0893
160	290	7	41.42857	40.42857	42.42857	0.952862	0.907946	0.092054
200	647	33	19.60606	18.60606	20.60606	0.902941	0.815303	0.184697
250	1852	135	13.71852	12.71852	14.71852	0.864117	0.746698	0.253302
315	896	114	7.859649	6.859649	8.859649	0.774257	0.599475	0.400525
400	1899	240	7.9125	6.9125	8.9125	0.775596	0.601549	0.398451
500	7431	1958	3.795199	2.795199	4.795199	0.582916	0.339791	0.660209
630	5471	2020	2.708416	1.708416	3.708416	0.460686	0.212232	0.787768
800	2006	1448	1.385359	0.385359	2.385359	0.161552	0.026099	0.973901
1000	1013	735	1.378231	0.378231	2.378231	0.159039	0.025293	0.974707
1250	674	316	2.132911	1.132911	3.132911	0.361616	0.130766	0.869234
1600	314	100	3.14	2.14	4.14	0.516908	0.267194	0.732806
2000	464	177	2.621469	1.621469	3.621469	0.447738	0.200469	0.799531
2500	114	44	2.590909	1.590909	3.590909	0.443038	0.196283	0.803717
3150	209	145	1.441379	0.441379	2.441379	0.180791	0.032685	0.967315
4000	267	149	1.791946	0.791946	2.791946	0.283654	0.08046	0.91954
5000	782	477	1.639413	0.639413	2.639413	0.242256	0.058688	0.941312

Liite 4. Karkearouheisen näytteen mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	1101	11	100.0909	99.09091	101.0909	0.980216	0.960823	0.039177
125	529	7	75.57143	74.57143	76.57143	0.973881	0.948443	0.051557
160	282	3	94	93	95	0.978947	0.958338	0.041662
200	738	78	9.461538	8.461538	10.46154	0.808824	0.654196	0.345804
250	1778	63	28.22222	27.22222	29.22222	0.931559	0.867802	0.132198
315	964	61	15.80328	14.80328	16.80328	0.880976	0.776118	0.223882
400	1792	65	27.56923	26.56923	28.56923	0.929995	0.86489	0.13511
500	7554	598	12.63211	11.63211	13.63211	0.853288	0.7281	0.2719
630	6868	993	6.916415	5.916415	7.916415	0.74736	0.558548	0.441452
800	1976	426	4.638498	3.638498	5.638498	0.645296	0.416406	0.583594
1000	2444	415	5.889157	4.889157	6.889157	0.709689	0.503658	0.496342
1250	790	84	9.404762	8.404762	10.40476	0.80778	0.652509	0.347491
1600	479	41	11.68293	10.68293	12.68293	0.842308	0.709482	0.290518
2000	605	57	10.61404	9.614035	11.61404	0.827795	0.685244	0.314756
2500	156	21	7.428571	6.428571	8.428571	0.762712	0.581729	0.418271
3150	286	61	4.688525	3.688525	5.688525	0.648415	0.420442	0.579558
4000	318	55	5.781818	4.781818	6.781818	0.705094	0.497157	0.502843
5000	608	472	1.288136	0.288136	2.288136	0.125926	0.015857	0.984143
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	1134	12	94.5	93.5	95.5	0.979058	0.958554	0.041446
125	534	7	76.28571	75.28571	77.28571	0.974122	0.948914	0.051086
160	286	3	95.33333	94.33333	96.33333	0.979239	0.958909	0.041091
200	745	84	8.869048	7.869048	9.869048	0.797346	0.635761	0.364239
250	1782	57	31.26316	30.26316	32.26316	0.93801	0.879862	0.120138
315	967	62	15.59677	14.59677	16.59677	0.879495	0.773511	0.226489
400	1807	65	27.8	26.8	28.8	0.930556	0.865934	0.134066
500	7693	599	12.84307	11.84307	13.84307	0.855523	0.73192	0.26808
630	6993	1013	6.903258	5.903258	7.903258	0.74694	0.557919	0.442081
800	2019	433	4.662818	3.662818	5.662818	0.646819	0.418375	0.581625
1000	2443	413	5.915254	4.915254	6.915254	0.710784	0.505214	0.494786
1250	794	85	9.341176	8.341176	10.34118	0.806598	0.650601	0.349399
1600	472	41	11.5122	10.5122	12.5122	0.840156	0.705862	0.294138
2000	591	59	10.01695	9.016949	11.01695	0.818462	0.669879	0.330121
2500	122	23	5.304348	4.304348	6.304348	0.682759	0.466159	0.533841
3150	461	156	2.955128	1.955128	3.955128	0.494327	0.24436	0.75564
4000	393	50	7.86	6.86	8.86	0.774266	0.599488	0.400512
5000	691	377	1.832891	0.832891	2.832891	0.294007	0.08644	0.91356
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
2000	572	66	8.666667	7.666667	9.666667	0.793103	0.629013	0.370987
2500	121	22	5.5	4.5	6.5	0.692308	0.47929	0.52071
3150	347	143	2.426573	1.426573	3.426573	0.416327	0.173328	0.826672
4000	386	62	6.225806	5.225806	7.225806	0.723214	0.523039	0.476961
5000	916	317	2.88959	1.88959	3.88959	0.485807	0.236008	0.763992

Liite 5. Pienirouheisen näytteen mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	1052	11	95.63636	94.63636	96.63636	0.979304	0.959036	0.040964
125	552	8	69	68	70	0.971429	0.943673	0.056327
160	284	2	142	141	143	0.986014	0.972224	0.027776
200	709	80	8.8625	7.8625	9.8625	0.797212	0.635546	0.364454
250	1862	66	28.21212	27.21212	29.21212	0.931535	0.867758	0.132242
315	932	76	12.26316	11.26316	13.26316	0.849206	0.721151	0.278849
400	1887	87	21.68966	20.68966	22.68966	0.911854	0.831478	0.168522
500	9439	895	10.54637	9.546369	11.54637	0.826785	0.683574	0.316426
630	8739	1573	5.555626	4.555626	6.555626	0.694919	0.482912	0.517088
800	2127	895	2.376536	1.376536	3.376536	0.407677	0.166201	0.833799
1000	1736	523	3.319312	2.319312	4.319312	0.536963	0.28833	0.71167
1250	767	143	5.363636	4.363636	6.363636	0.685714	0.470204	0.529796
1600	428	63	6.793651	5.793651	7.793651	0.743381	0.552615	0.447385
2000	543	84	6.464286	5.464286	7.464286	0.732057	0.535908	0.464092
2500	100	28	3.571429	2.571429	4.571429	0.5625	0.316406	0.683594
3150	355	182	1.950549	0.950549	2.950549	0.32216	0.103787	0.896213
4000	409	89	4.595506	3.595506	5.595506	0.64257	0.412897	0.587103
5000	737	240	3.070833	2.070833	4.070833	0.5087	0.258776	0.741224
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
100	1045	12	87.08333	86.08333	88.08333	0.977294	0.955104	0.044896
125	558	9	62	61	63	0.968254	0.937516	0.062484
160	285	3	95	94	96	0.979167	0.958767	0.041233
200	721	88	8.193182	7.193182	9.193182	0.782447	0.612224	0.387776
250	1860	73	25.47945	24.47945	26.47945	0.92447	0.854644	0.145356
315	936	73	12.82192	11.82192	13.82192	0.855302	0.731542	0.268458
400	1888	89	21.21348	20.21348	22.21348	0.909965	0.828036	0.171964
500	9441	907	10.40904	9.409041	11.40904	0.8247	0.680131	0.319869
630	8672	1559	5.56254	4.56254	6.56254	0.69524	0.483359	0.516641
800	2132	698	3.054441	2.054441	4.054441	0.506714	0.256759	0.743241
1000	1740	519	3.352601	2.352601	4.352601	0.540505	0.292145	0.707855
1250	770	144	5.347222	4.347222	6.347222	0.684902	0.46909	0.53091
1600	427	62	6.887097	5.887097	7.887097	0.746421	0.557145	0.442855
2000	554	66	8.393939	7.393939	9.393939	0.787097	0.619521	0.380479
2500	117	23	5.086957	4.086957	6.086957	0.671429	0.450816	0.549184
3150	253	172	1.47093	0.47093	2.47093	0.190588	0.036324	0.963676
4000	447	90	4.966667	3.966667	5.966667	0.664804	0.441965	0.558035
5000	780	259	3.011583	2.011583	4.011583	0.501444	0.251446	0.748554
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r ²	a
2000	532	93	5.72043	4.72043	6.72043	0.7024	0.493366	0.506634
2500	103	26	3.961538	2.961538	4.961538	0.596899	0.356289	0.643711
3150	299	188	1.590426	0.590426	2.590426	0.227926	0.05195	0.94805
4000	413	82	5.036585	4.036585	6.036585	0.668687	0.447142	0.552858
5000	822	340	2.417647	1.417647	3.417647	0.414802	0.172061	0.827939

Liite 6. Kuitumaisen näytteen mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	1178	20	58.9	57.9	59.9	0.966611	0.934337	0.065663
125	509	13	39.15385	38.15385	40.15385	0.950192	0.902864	0.097136
160	283	9	31.44444	30.44444	32.44444	0.938356	0.880512	0.119488
200	747	35	21.34286	20.34286	22.34286	0.910486	0.828985	0.171015
250	1615	160	10.09375	9.09375	11.09375	0.819718	0.671938	0.328062
315	1037	121	8.570248	7.570248	9.570248	0.791019	0.625711	0.374289
400	1678	206	8.145631	7.145631	9.145631	0.781316	0.610455	0.389545
500	5351	1219	4.389664	3.389664	5.389664	0.628919	0.39554	0.60446
630	4249	1590	2.672327	1.672327	3.672327	0.455386	0.207377	0.792623
800	1929	854	2.258782	1.258782	3.258782	0.386274	0.149207	0.850793
1000	1861	617	3.016207	2.016207	4.016207	0.502018	0.252022	0.747978
1250	762	178	4.280899	3.280899	5.280899	0.621277	0.385985	0.614015
1600	396	79	5.012658	4.012658	6.012658	0.667368	0.445381	0.554619
2000	488	127	3.84252	2.84252	4.84252	0.586992	0.344559	0.655441
2500	99	29	3.413793	2.413793	4.413793	0.546875	0.299072	0.700928
3150	234	115	2.034783	1.034783	3.034783	0.340974	0.116263	0.883737
4000	269	174	1.545977	0.545977	2.545977	0.214447	0.045987	0.954013
5000	615	554	1.110108	0.110108	2.110108	0.052181	0.002723	0.997277
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	1134	18	63	62	64	0.96875	0.938477	0.061523
125	503	13	38.69231	37.69231	39.69231	0.949612	0.901764	0.098236
160	282	8	35.25	34.25	36.25	0.944828	0.892699	0.107301
200	767	46	16.67391	15.67391	17.67391	0.886839	0.786483	0.213517
250	1628	113	14.40708	13.40708	15.40708	0.87019	0.75723	0.24277
315	1029	113	9.106195	8.106195	10.10619	0.802102	0.643367	0.356633
400	1687	211	7.995261	6.995261	8.995261	0.777661	0.604756	0.395244
500	5263	1152	4.568576	3.568576	5.568576	0.640842	0.410678	0.589322
630	4327	1613	2.682579	1.682579	3.682579	0.456902	0.20876	0.79124
800	1925	846	2.275414	1.275414	3.275414	0.38939	0.151625	0.848375
1000	1846	608	3.036184	2.036184	4.036184	0.504482	0.254503	0.745497
1250	746	173	4.312139	3.312139	5.312139	0.623504	0.388757	0.611243
1600	386	75	5.146667	4.146667	6.146667	0.67462	0.455113	0.544887
2000	493	99	4.979798	3.979798	5.979798	0.665541	0.442944	0.557056
2500	89	29	3.068966	2.068966	4.068966	0.508475	0.258546	0.741454
3150	227	159	1.427673	0.427673	2.427673	0.176166	0.031034	0.968966
4000	311	155	2.006452	1.006452	3.006452	0.334764	0.112067	0.887933
5000	585	527	1.110057	0.110057	2.110057	0.052158	0.00272	0.99728
taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
2000	465	152	3.059211	2.059211	4.059211	0.507293	0.257347	0.742653
2500	88	36	2.444444	1.444444	3.444444	0.419355	0.175858	0.824142
3150	212	191	1.109948	0.109948	2.109948	0.052109	0.002715	0.997285
4000	340	152	2.236842	1.236842	3.236842	0.382114	0.146011	0.853989
5000	609	415	1.46747	0.46747	2.46747	0.189453	0.035892	0.964108

Liite 7. Vertailumateriaalin mittaustulokset.

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	1182	27	43.77778	42.77778	44.77778	0.955335	0.912665	0.087335
125	487	19	25.63158	24.63158	26.63158	0.924901	0.855442	0.144558
160	281	15	18.73333	17.73333	19.73333	0.898649	0.807569	0.192431
200	768	43	17.86047	16.86047	18.86047	0.893958	0.799161	0.200839
250	1566	184	8.51087	7.51087	9.51087	0.789714	0.623649	0.376351
315	996	187	5.326203	4.326203	6.326203	0.683855	0.467657	0.532343
400	1686	370	4.556757	3.556757	5.556757	0.640078	0.4097	0.5903
500	5294	1845	2.869377	1.869377	3.869377	0.483121	0.233406	0.766594
630	4333	2242	1.932649	0.932649	2.932649	0.318023	0.101139	0.898861
800	1981	1524	1.299869	0.299869	2.299869	0.130385	0.017	0.983
1000	922	752	1.226064	0.226064	2.226064	0.101553	0.010313	0.989687
1250	670	407	1.646192	0.646192	2.646192	0.244197	0.059632	0.940368
1600	281	135	2.081481	1.081481	3.081481	0.350962	0.123174	0.876826
2000	403	219	1.840183	0.840183	2.840183	0.29582	0.087509	0.912491
2500	78	53	1.471698	0.471698	2.471698	0.19084	0.03642	0.96358
3150	218	175	1.245714	0.245714	2.245714	0.109415	0.011972	0.988028
4000	260	165	1.575758	0.575758	2.575758	0.223529	0.049965	0.950035
5000	596	528	1.128788	0.128788	2.128788	0.060498	0.00366	0.99634

taajuus	p, max	p, min	s	s-1	s+1	r	r^2	a
100	1208	27	44.74074	43.74074	45.74074	0.956275	0.914462	0.085538
125	486	19	25.57895	24.57895	26.57895	0.924752	0.855167	0.144833
160	280	14	20	19	21	0.904762	0.818594	0.181406
200	809	43	18.81395	17.81395	19.81395	0.899061	0.808311	0.191689
250	1558	187	8.331551	7.331551	9.331551	0.785673	0.617283	0.382717
315	1017	198	5.136364	4.136364	6.136364	0.674074	0.454376	0.545624
400	1685	385	4.376623	3.376623	5.376623	0.628019	0.394408	0.605592
500	5178	1862	2.780881	1.780881	3.780881	0.471023	0.221862	0.778138
630	4257	2285	1.86302	0.86302	2.86302	0.301437	0.090864	0.909136
800	1972	1569	1.256851	0.256851	2.256851	0.11381	0.012953	0.987047
1000	955	752	1.269947	0.269947	2.269947	0.118922	0.014142	0.985858
1250	684	398	1.718593	0.718593	2.718593	0.264325	0.069868	0.930132
1600	288	132	2.181818	1.181818	3.181818	0.371429	0.137959	0.862041
2000	411	220	1.868182	0.868182	2.868182	0.302694	0.091624	0.908376
2500	85	54	1.574074	0.574074	2.574074	0.223022	0.049739	0.950261
3150	216	176	1.227273	0.227273	2.227273	0.102041	0.010412	0.989588
4000	256	158	1.620253	0.620253	2.620253	0.236715	0.056034	0.943966
5000	611	523	1.16826	0.16826	2.16826	0.077601	0.006022	0.993978

Liite 8. Haastattelujen [63 - 66] yhteenveto. Kysymyksiin vastasivat:

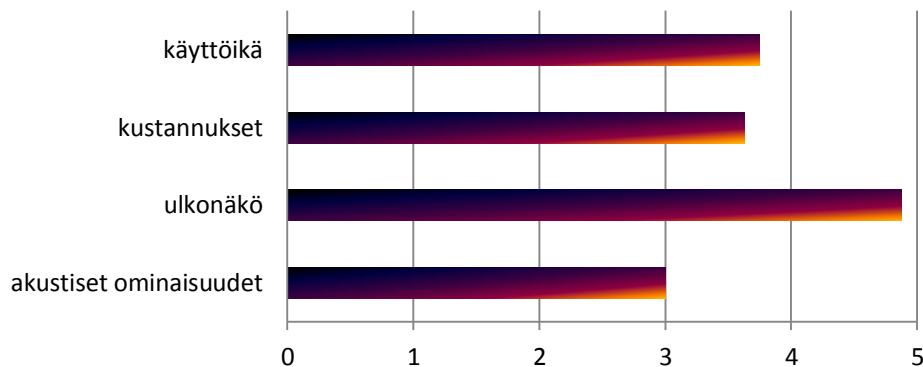
Liikennesuunnitteluinsinööri Jaana Mäkinen, Turun kaupunki

Katuinsinööri Kalevi Salonen, Tampereen kaupunki

Projektinjohtaja Jarkko Karttunen, Helsingin kaupunki

Katuinsinööri Salla Hänninen, Espoon kaupunki

1. Kuinka tärkeitä viime vuosina ovat olleet seuraavat valintakriteerit meluaidalle? Asteikolla 1 – 5 (5 = tärkeä, 1 = ei tärkeä).



Aidan ulkonäkö ja design koettiin ehdottomasti tärkeimmäksi seikaksi meluaitaa suunniteltaessa. Usein meluaidan toteutus on hinnan ja ulkonäön kompromissi, kuitenkin ulkonäön ollessa tärkeämpi. Myös meluaidan kestävyys ja käyttöikä on viime vuosina kiinnitetty huomiota. Ääntä absorboivien aitojen tarve ei ole viime vuosina kasvanut merkittävästi. Aidan ylläpito, huollettavuus sekä korjaukset ovat myös huomionarvoisia asioita.

2. Mistä materiaalista meluaidat on viime vuosina useimmiten valmistettu?

Ääntä heijastavia aitoja on valmistettu useista eri materiaaleista (betoni, puu, teräs, kivi), puun ollessa hieman muita suosituimpi materiaali. Absorboivat aidat on useimmiten toteutettu teräskasettiratkaisun avulla. Melukaiteet ovat useimmiten betonia.

3. Kun tarve meluaidalle havaitaan, alkaako aidan (ulkonäön) suunnittelu tapauskohtaisesti vai otetaanko ensin yhteyttä meluaitojen valmistajiin, joilla on valmiita aitaratkaisuja (joita voi muunnella rimoituksilla, väreillä, jne.)?

Täysin yksimielinen vastaus, suunnitellaan tapauskohtaisesti.

4. Vapaa sana:

Aitojen maisemointia voisi kehittää esimerkiksi erilaisilla köynnöskasveilla, jotka selviävät talvenkin yli. Ympäristöön sulauttaminen koettiin hyvin tärkeäksi, joko juuri kasvillisuuden avulla tai muuten hienolla aidan toteutuksella, esimerkiksi valaistusta hyväksikäyttäen.